

**VŠB - Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

2016

Česák Michal

**VŠB - Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra elektroenergetiky**

**Fázování asynchronního generátoru na síť**  
**Synchronizing of Asynchronous Generator with**  
**Network**

2016

Česák Michal

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra elektroenergetiky

## Zadání bakalářské práce

Student: **Michal Česák**  
Studijní program: B2649 Elektrotechnika  
Studijní obor: 3907R001 Elektroenergetika  
Téma: **Fázování asynchronního generátoru na síť**  
**Synchronizing of Asynchronous Generator with Network**  
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Teoretický rozbor problematiky asynchronních generátorů
2. Měření základních charakteristik asynchronního stroje
3. Výpočet prvků náhradního schématu za účelem sestavení simulačního modelu
4. Tvorba modelu a simulace fázování asynchronního generátoru na síť
5. Praktická realizace fázování asynchronního generátoru na síť
6. Vyhodnocení a závěr

Seznam doporučené odborné literatury:


Petrov, G.N. - Elektrické stroje 2, ACADEMIA 1982  
Hrabovcová, V. - Meranie a modelovanie elektrických strojov, EDIS 2008  
Boldea I., Nasar S.A. - The Induction Machine Handbook, CRC Press 2002  
Simões, M.G - Modeling and Analysis with Induction Generators, CRC Press 2014  
Bašta, J. - Měření na elektrických strojích 4, SNTL 1962

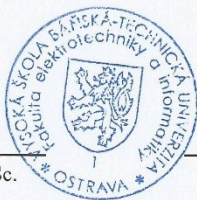
Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

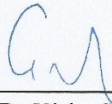
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Václav Čech, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2015

Datum odevzdání: 29.04.2016

  
prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.  
vedoucí katedry



  
prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

## Prohlášení studenta

*„Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“*

V Havířově, dne: .....28.4..... 2016

Jméno a příjmení: Michal Česák .....

Podpis: .....Česák.....

## **Poděkování**

Tímto děkuji vedoucímu práce Ing. Václavu Čechovi a školitelům Ing. Stanislavu Rusnokovi a Ing. Pavlu Sobotovi za ochotu vést mou maličkost k úspěšnému cíli bakalářského studia, za odbornou a metodickou pomoc i přes jejich časové vytížení a jejich velmi účinnou psychicko-pedagogickou podporu. Zvláštní dík patří mé rodině za morální a materiální podporu během studia.

## **Abstrakt**

Obsahem této práce je teoretický rozbor funkce asynchronního stroje jak v motorickém tak i v generatorickém chodu. Hluběji pak využití asynchronního stroje jako zdroje energie a nutné předpoklady pro jeho připojení do distribuční sítě či provoz v ostrovním režimu. Součástí této práce je návrh náhradního schématu pro simulaci a kondenzátorové baterie nutné pro buzení stroje, dále pak poznatky zjištěné praktickou realizací přifázování asynchronního generátoru k síti a simulace fázování v programu EMTP-ATP. V závěru je provedeno vyhodnocení a porovnání experimentálně naměřených dat se simulovanými.

## **Klíčová slova**

Asynchronní generátor, fázování, buzení, simulace, simulační model

## **Abstract**

The aim of this thesis is pointed at theoretical description of an induction machine in motoric as well as in generatoric mode of operation. Deeper point of this paper aims on the usage of an induction machine for electricity production purposes and needed prerequisites for connecting said machine into the commercial power grid or operation in an off-grid regime. This paper also contains discoveries obtained by practical realization of phasing an induction generator into the grid and simulation of phasing in ATP-EMTP software, along with the design and calculation of substitute scheme for simulation itself and capacitor battery needed for excitation of the machine. Comparison and evaluation of experimentally obtained data with simulated ones are made in the summary of this paper.

## **Key words**

Asynchronous generator, Phasing, excitation, simulation, simulation model

<b>1</b>	<b>Asynchronní stroje obecně .....</b>	<b>12</b>
1.1	Konstrukce .....	12
1.2	Základní údaje asynchronních strojů .....	14
1.3	Princip činnosti asynchronního stroje .....	14
1.4	Parametry a charakteristiky asynchronního stroje .....	15
1.5	Náhradní schéma asynchronního stroje .....	18
<b>2</b>	<b>Asynchronní stroj jako generátor elektrické energie .....</b>	<b>19</b>
2.1	Provoz asynchronního stroje v generatorickém režimu .....	19
2.2	Asynchronní generátor pracující do veřejné sítě .....	19
2.3	Asynchronní generátor v ostrovním režimu .....	19
2.4	Buzení asynchronního stroje .....	20
2.5	Fázování .....	20
<b>3</b>	<b>Měření charakteristických parametrů asynchronního stroje .....</b>	<b>21</b>
3.1	Použitá zařízení .....	21
3.2	Měření odporu statorového vinutí .....	21
3.3	Charakteristika naprázdno .....	22
3.4	Charakteristika nakrátko .....	25
<b>4</b>	<b>Simulace fázování v ATP-EMTP .....</b>	<b>28</b>
4.1	O programu .....	28
4.2	Simulační model .....	28
4.3	Výstupy ze simulace .....	32
<b>5</b>	<b>Experimentální fázování stroje k síti .....</b>	<b>36</b>
<b>6</b>	<b>Vyhodnocení simulace a praktického experimentu .....</b>	<b>38</b>
6.1	Simulace .....	38
6.2	Měření .....	38
<b>7</b>	<b>Závěr BP .....</b>	<b>40</b>
<b>8</b>	<b>Bibliografie .....</b>	<b>41</b>
<b>9</b>	<b>Seznam příloh .....</b>	<b>42</b>

## Seznam použitých zkratek a symbolů

symbol	Název veličiny	jednotka
B	Magnetická indukce	(T)
$\cos\varphi$	Účíník	(-)
$\cos\varphi_0$	Účíník naprázdno	(-)
$\cos\varphi_k$	Účíník nakrátko	(-)
F	Síla	(N)
$f_1$	Frekvence napětí statoru	(Hz)
I	Elektrický proud	(A)
$I_0$	Proud naprázdno	(A)
$I_2$	Proud rotoru	(A)
$L_\mu$	Magnetizační indukčnost	(H)
$L_\sigma$	Rozptylová indukčnost	(H)
l	Délka	(m)
$M_{\max}$	Mechanický moment maximální (moment zvratu)	(N·m)
$n_1$	Otáčky statoru	(min <sup>-1</sup> )
$n_2$	Otáčky rotoru	(min <sup>-1</sup> )
$n_n$	Otáčky	(min <sup>-1</sup> )
P	Činný výkon	(W)
$P_0$	Příkon naprázdno	(W)
$P_n$	Jmenovitý výkon	(W)
p	Počet pólových dvojic	(-)
$R_{Fe}$	Odpor zohledňující ztráty vířivými proudy a ztráty magnetizační	( $\Omega$ )
$R_{kN}$	Jmenovitý odpor podélné větve	( $\Omega$ )
r	Rameno síly (délka)	(m)
S	Plocha	(m <sup>2</sup> )
s	Skluz	(-)
$U_0$	Napětí naprázdno	(V)
$U_f$	Fázové napětí	(V)
$U_s$	Sdružené napětí	(V)
$X_{kN}$	Jmenovitá reaktance nakrátko	( $\Omega$ )
$X_\mu$	Magnetizační reaktance	( $\Omega$ )
$\Phi$	Magnetický tok	(Wb)
$\Omega$	Úhlová rychlost mechanická	(rad·s <sup>-1</sup> )
$\omega$	Úhlová rychlost elektrická	(rad·s <sup>-1</sup> )



## Seznam ilustrací

Obr. 1 Klecové vinutí asynchronního stroje [7] .....	12
Obr. 2 Konstrukční schéma motoru s kotvou nakrátko [8] .....	12
Obr. 3 Konstrukční schéma motoru s kroužkovou kotvou [8] .....	13
Obr. 4 Dvouvrstvé a) a jednovrstvé b) vinutí [1] .....	13
Obr. 5 Vznik mechanické tažné síly trojfázového vinutí [6] .....	15
Obr. 6 Energetická bilance asynchronního stroje [6] .....	16
Obr. 7 Momentová charakteristika asynchronního stroje [9] .....	17
Obr. 8 Náhradní schéma asynchronního stroje [14] .....	18
Obr. 9 Nabuzení asynchronního stroje [10] .....	20
Obr. 10 Schéma měření statorového vinutí .....	21
Obr. 11 Blokové schéma měření naprázdno .....	22
Obr. 12 Náhradní schéma jedné fáze AM ve stavu naprázdno [6] .....	22
Obr. 13 Charakteristiky naprázdno [ $P_0; I_0 = f(U_0)$ ] .....	24
Obr. 14 Charakteristika naprázdno [ $\cos \varphi_0 = f(U_0)$ ] .....	24
Obr. 15 Blokové schéma měření nakrátko .....	25
Obr. 16 Náhradní schéma jedné fáze asynchronního motoru nakrátko [6] .....	25
Obr. 17 Signifikantní charakteristiky stroje nakrátko .....	27
Obr. 18 Model asynchronního stroje UM3 .....	28
Obr. 19 Základní nastavení paramterů modelu UM3 .....	28
Obr. 20 Nastavení parametrů obvodových prvků náhradního schématu simulačního modelu UM3 .....	29
Obr. 21 Simulační model fázování asynchronního generátoru k síti .....	31
Obr. 22 Průběh napětí jedné fáze na svorkách generátoru při nenabuzeném stroji s časem sepnutí $t=1s$ .....	32
Obr. 23 Průběh proudu jedné fáze při nenabuzeném stroji s časem sepnutí $t=1s$ .....	32
Obr. 24 Průběh napětí jedné fáze při fázování nabuzeného generátoru s časem sepnutí $v=5,3s$ .....	33
Obr. 25 Průběh proudu jedné fáze při fázování nabuzeného generátoru s časem sepnutí $v=5,3s$ .....	33
Obr. 26 Detail odečtu časového zpoždění napětí těsně před přifázováním .....	34
Obr. 27 Průběh napětí jedné fáze při fázování nabuzeného generátoru s časem sepnutí $v=4,8731s$ .....	34
Obr. 28 Průběh proudu jedné fáze při fázování nabuzeného generátoru s časem sepnutí $v=4,8731s$ .....	35
Obr. 29 Detail průběhů napětí jedné fáze s časem sepnutí $v=4,8731s$ .....	35
Obr. 30 Schéma zapojení experimentálního přifázování stroje k distribuční síti 400/230V .....	36
Obr. 31 Rázový proud asynchronním generátorem při splněných podmínkách fázování .....	37
Obr. 32 Průběh rázového proudu asynchronním generátorem při splněných podmínkách fázování .....	37

## Seznam tabulek

Tab. 1 Štítkové údaje asynchronního motoru .....	21
Tab. 2 Štítkové údaje asynchronního dynamometru .....	21
Tab. 3 Naměřené hodnoty odporu vinutí .....	21
Tab. 4 Štítkové údaje asynchronního motoru .....	36
Tab. 5 Štítkové údaje asynchronního dynamometru .....	36

## Úvod

Asynchronní stroje jsou jedny z nejjednodušších a v dnešní době nejlevnějších elektrických točivých strojů, které jsou na trhu k mání a nabízí se nám možnost využití tohoto stroje pro výrobu elektrické energie, v případě náhlého blackoutu i jako záložního zdroje pro maloodběrové sítě v místech, kde jsou vhodné podmínky pro takovou aplikaci. Asynchronní stroj je možné použít jako generátor poháněný turbínou větrné nebo malé vodní elektrárny. Protože jsou asynchronní stroje ve srovnání s jinými elektrickými točivými stroji levnější, nenáročné na údržbu, robustní a spolehlivé, nabízejí se jako vhodní kandidáti na použití v těchto aplikacích i přes nižší účinnost oproti synchronním strojům. Ty jsou podstatně dražší a vyžadují větší množství péče a provozních nákladů.

Samotný proces připojení generátoru do distribuční sítě nazýváme fázování. K tomu je nutné dodržet určité předpoklady a podmínky. V případě ostrovní sítě nebo rozbíhání asynchronního generátoru bez prvotního připojení do distribuční sítě je potřeba se zabývat buzením samotného stroje, protože ke svému chodu potřebuje jalovou energii. Vhodným způsobem buzení asynchronního generátoru je např. kondenzátorová baterie připojená paralelně k zátěži, kterou je potřeba správně navrhnout.

Ke snížení pořizovacích výdajů je vhodné použití simulačního softwaru, kde je možnost si tzv. „nanečisto“ vyzkoušet svůj návrh a zjistit, bude-li fungovat či nikoliv a připravit si předpoklady pro dimenzování ochrany či optimalizaci přechodových dějů.

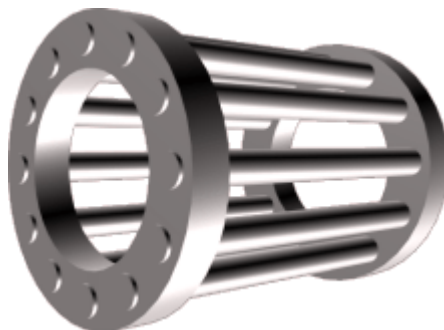
# 1 Asynchronní stroje obecně

## 1.1 Konstrukce

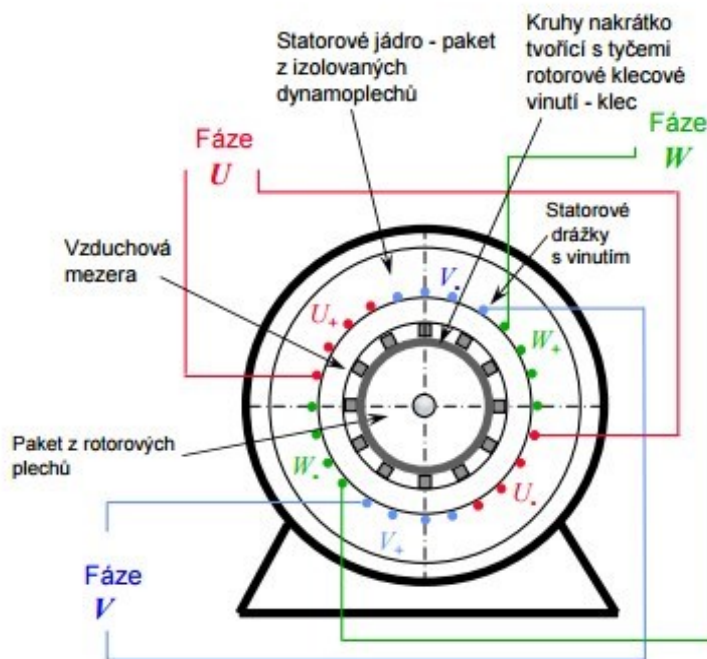
Asynchronní točivé stroje jsou složeny z magnetického obvodu, jež sestává ze dvou částí, statoru a rotoru. Ve statoru je uloženo statorové budící vinutí umístěné v drážkách vyfrézovaných do paketu složeného z nalisovaných elektrotechnických plechů. Rotor se skládá z hřídele, na které je rovněž nalisován paket rotorových plechů s drážkami, do kterých je vloženo rotorové vinutí. Rotor může být proveden různými způsoby a na základě těchto provedení rozlišujeme tyto druhy asynchronních strojů:

- a) S kotvou nakrátko (klecové)
- b) S kroužkovou kotvou

U strojů s kotvou nakrátko je vinutí ve formě odlitku složeného z tyčí spojených dvěma zkratovacími kruhy (viz. Obr. 1). Kde každá tyč rotorové klece představuje jednu fázi rotoru.

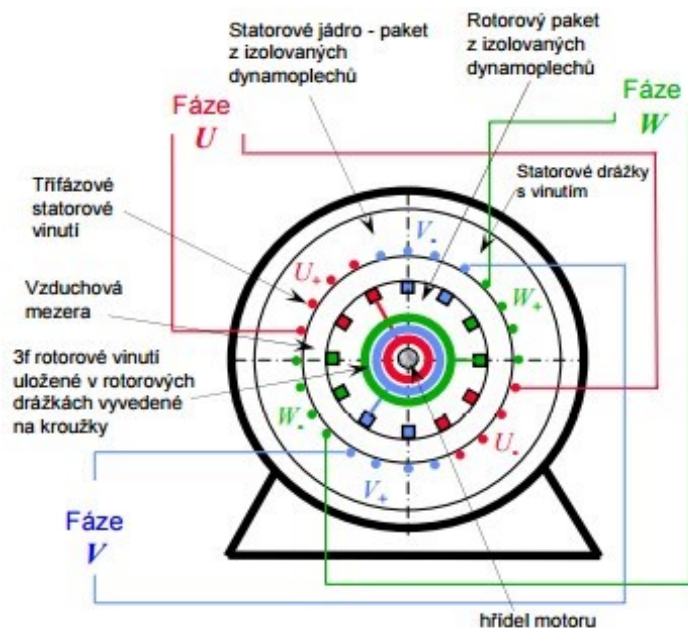


Obr. 1 Klecové vinutí asynchronního stroje [7]

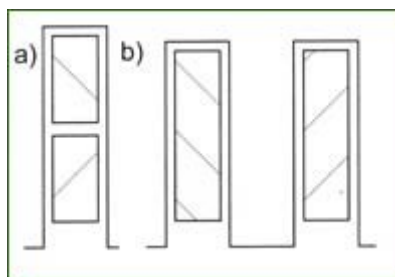


Obr. 2 Konstruktivní schéma motoru s kotvou nakrátko [8]

Vinutí strojů s kroužkovou kotvou je tvořeno izolovanými skupinami cívek vloženými do drážek rotoru (viz. Obr. 2). U motorů s kotvou nakrátko rozlišujeme jednovrstvé nebo dvouvrstvé vinutí, tzn. počet cívkových skupin v drážce. U dvouvrstvého vinutí jsou cívky uloženy zpravidla nad sebou, což znamená, že každá cívka má jednu aktivní stranu v horní a druhou v dolní vrstvě drážky. U jednovrstvého vinutí leží aktivní strany cívek namísto v jedné drážce nad sebou, ve dvou drážkách vedle sebe (viz. Obr. 4).[1] Na rotoru se nacházejí kroužky osazené pevně umístěnými kartáči, nejčastěji vyrobené z elektrotechnického uhlíku, které tvoří společně s kroužky kluzný kontakt, umožňující vyvedení vinutí kotvy na svorkovnici stroje. Kartáče jsou pochopitelně náchylné k opotřebení obrousáváním uhlíku při chodu stroje a je proto třeba jim věnovat pozornost při dlouhodobějším provozu.



Obr. 3 Konstrukční schéma motoru s kroužkovou kotvou [8]



Obr. 4 Dvouvrstvé a) a jednovrstvé b) vinutí [1]

## 1.2 Základní údaje asynchronních strojů

Pro správný provoz asynchronního stroje jsou na štítku zařízení uvedeny základní údaje, který musí být vyroben tak, aby údaje na něm uvedené byly čitelné po dobu jeho předpokládané životnosti.

Nejvýznamnější údaje uvedené na štítku jsou tyto:

- Druh zařízení (např. MOT3 ~ )
- Druh izolace (např. IP-44V)
- Druh proudu (např. jednofázový, trojfázový)
- Jmenovitý výkon (v kW)
- Jmenovité otáčky (v ot./min.)
- Zapojení vinutí statoru (hvězda/trojúhelník, obvykle značeno symboly)
- Jmenovitý proud statoru (A)
- Jmenovité napětí statoru (V)
- Jmenovitý účinník (-)
- Druh zatížení (např. S2 – krátkodobý chod)

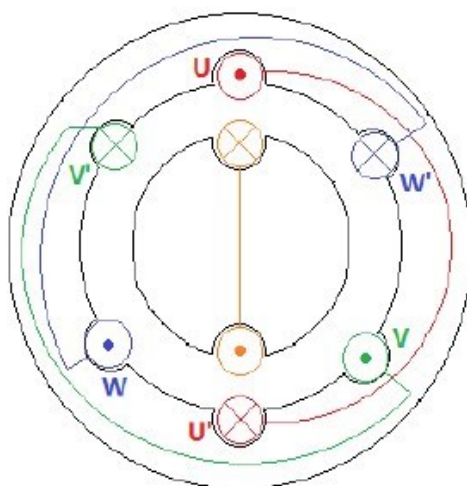
Dále jsou na štítku uvedeny údaje jako typ zařízení a jeho tvar, rok výroby, váha stroje, sériové či inventární číslo apod. [5]

## 1.3 Princip činnosti asynchronního stroje

Funkce indukčního stroje je založena na využití točivého magnetického pole, které vzniká po připojení trojfázového statorového vinutí k napájecí síti. Otáčky magnetického pole jsou tedy závislé na frekvenci napájecího napětí a počtu pólových dvojic statoru. Počet pólových dvojic odpovídá počtu trojfázových vinutí rozložených v drážkách statoru. [2]

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p} [\text{min}^{-1}] \quad (1)$$

Zavedením střídavého trojfázového proudu na statorové vinutí se indukují napětí ve vinutí rotoru, jímž následně začíná protékat proud a vytváří vlastní magnetické pole. Interakcí těchto dvou polí působí na vodiče rotorového vinutí mechanická síla a dle Lenzova zákona budou mít vodiče tendenci vychylovat se ve směru otáčení magnetického pole. [4]



**Obr. 5 Vznik mechanické tažné síly trojfázového vinutí [6]**

Rotor z původního klidu zrychluje a rozdíl rychlosti otáčení točivého pole statoru a vodičů na rotoru se stále zmenšuje, tím klesá i mechanická síla a proud ve vodičích. Jakmile rotor dosáhne jistých otáček, je mechanická síla rovna mechanickým odporům, rotor dále nezrychluje a udržuje si dosaženou hodnotu otáček. Tento stav se nazývá dynamická rovnováha. Otáčky, kterých rotor dosáhne, jsou tedy nižší než otáčky magnetického pole statoru o tzv. skluz, který je dán vztahem:

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} [-] \quad (2)$$

Pro otáčky rotoru tedy platí:

$$n_2 = n_1 \cdot (1 - s) = \frac{60 \cdot f_1}{p} \cdot (1 - s) [\text{min}^{-1}] \quad (3)$$

## 1.4 Parametry a charakteristiky asynchronního stroje

### 1.4.1 Moment asynchronního stroje

Pro obecný vztah na výpočet momentu je možné vycházet z úvahy že:

$$M = F \cdot r [\text{N} \cdot \text{m}] \quad (4)$$

$$F = B \cdot I \cdot l [\text{N}] \quad (5)$$

$$B = \frac{\Phi}{S} [\text{T}] \quad (6)$$

Po dosazení do vzorce pro moment a úpravě můžeme psát, že

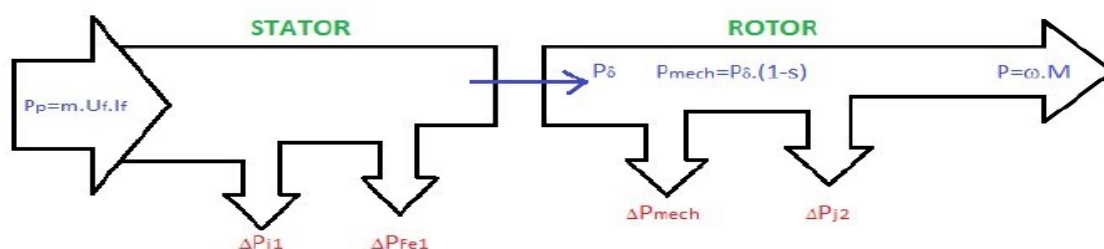
$$M \approx \Phi \cdot I_2. \quad (7)$$

Kde  $\Phi$  je magnetický tok a  $I_2$  rotorový proud. Mechanický moment je také definován jako podíl mechanického výkonu k úhlové rychlosti, moment tedy lze počítat dle vztahu: [6]

$$M = \frac{P}{\Omega} = \frac{P}{\frac{2\pi \cdot n}{60}} \text{ [N} \cdot \text{m]} \quad (8)$$

#### 1.4.2 Ztráty asynchronního stroje

Vlivem odporů vinutí, rozptylových, magnetizačních reaktancí, přenosu výkonu přes vzduchovou mezeru, mechanických odporů ložisek apod. vznikají výkonové ztráty. Tyto ztráty vznikají v jakémkoliv provozním režimu, ve kterém by mohl být stroj provozován s tím rozdílem, že se mění pouze směr přenášeného výkonu.



Obr. 6 Energetická bilance asynchronního stroje [6]

$P_p$  ...Elektrický příkon stroje

$$P_p = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi \text{ [W]} \quad (9)$$

$\Delta P_{j1,2}$  ...Jouleovy ztráty na vinutí statoru;rotoru

$\Delta P_{Fe1}$  ...Ztráty v manetickém obvodu

$P_\delta$  ...Výkon přenášený přes vzduchovou mezeru

$\Delta P_{mech}$  ...Ztráty mechanické

$P$  ...Mechanický výkon na hřídeli

Vzhledem ke ztrátám je jmenovitý výkon na hřídeli AM roven

$$P_n = \eta \cdot P_p \text{ [W]} \quad (10)$$

kde účinnost

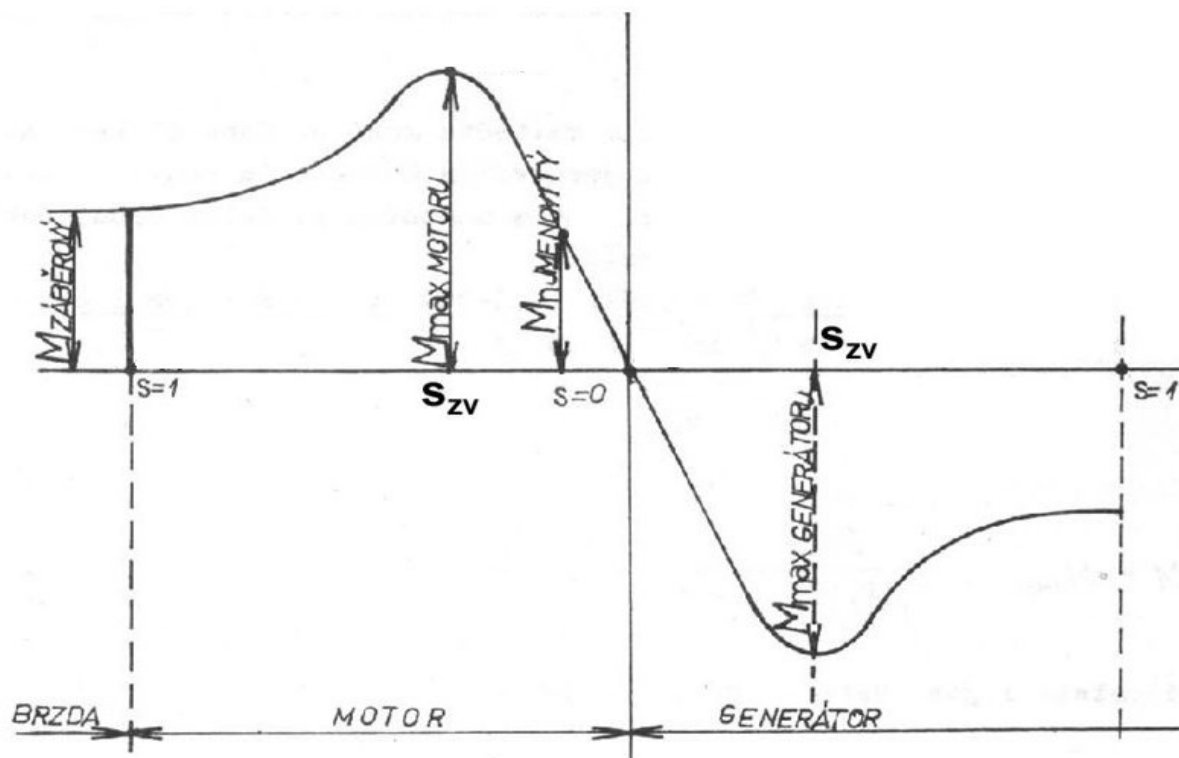
$$\eta = \frac{P_n}{P_p} [-] \quad (11)$$

bývá obvykle uvedena výrobcem v katalogu stroje.

### 1.4.3 Momentová charakteristika

Zobrazuje závislost mechanického momentu stroje na skluzu či otáčkách (Obr. 7) a rozlišujeme v ní tři základní režimy.

- a) Režim generatorický (pro  $s < 0$ )
  - Otáčky jsou nadsynchronní, stroj se chová jako generátor a dodává výkon do napájecí sítě, stroj mění mechanickou energii na elektrickou.
- b) Režim motorický ( $0 < s < 1$ )
  - Stroj mění elektrickou energii na mechanickou.
- c) Režim brzdný ( $s > 1$ )
  - Rotor se otáčí proti smyslu otáčení magnetického pole statoru, otáčky klesají.



Obr. 7 Momentová charakteristika asynchronního stroje [9]

V momentové charakteristice jsou důležité hodnoty vyznačených momentů, tedy moment záběrný  $M_z$ , moment maximální (zvratu)  $M_{\max}$  jak pro motorickou tak pro generatorickou oblast a moment jmenovitý  $M_n$ . Záběrný moment je takový, který je potřeba vyvinout, aby se rotor stroje uvedl do pohybu z klidového stavu. Oblast mezi momentem záběrným a momentem zvratu se nazývá labilní neboli nestabilní, neboť stroj provozovaný v této oblasti nevyvine dostatečný moment pro překonání protimomentu a po připojení zátěže by došlo k jeho zastavení vlivem zvýšení hodnoty skluzu. Mezi zvratovým momentem a momentem nulovým (synchronní otáčky) se nachází oblast stabilní, kdy je bezproblémový provoz motoru možný. Moment zvratu je možné vyjádřit z Klossova vztahu pro točivý moment, který počítá s hodnotami v ustáleném stavu. [2]

$$M = \frac{2M_{\max}}{\frac{s}{s_z} + \frac{s_z}{s}} [\text{N} \cdot \text{m}] \quad (12)$$



#### 1.4.4 Charakteristiky naprázdno

Měřením charakteristik naprázdno je možné určit ztráty v železe  $\Delta P_{Fe}$ , mechanické ztráty  $\Delta P_{mech}$ , proud naprázdno  $I_0$  a účinník  $\cos\varphi_0$  naprázdno pro jmenovité napětí  $U_n$ . Při proměřování charakteristik je hřídel motoru nezatížená a otáčí se volně. Měření se provádí pro hodnoty napětí v rozmezí 120 až 30%  $U_n$  a zaznamenávají se hodnoty proudu naprázdno a příkonu naprázdno.

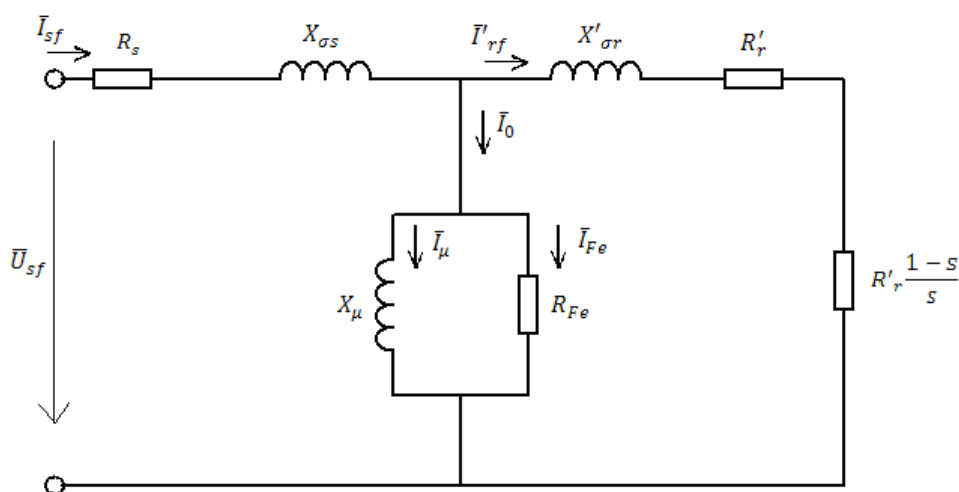
#### 1.4.5 Charakteristiky nakrátko

Měřením charakteristik nakrátko je možné určit ztráty ve vinutí nakrátko  $\Delta P_k$ , procentní napětí nakrátko  $u_k\%$  a účinník nakrátko  $\cos\varphi_k$ . Stav nakrátko motoru je takový, kdy je hřídel rotoru blokována tak, aby se rotor netočil (obvykle realizováno zabrzděným dynamometrem). Při sníženém napětí se měří několik hodnot proudu a příkonu (obvykle 5-8).

#### 1.4.6 Zatěžovací (pracovní) charakteristiky

Měřením provozních charakteristik je možné určit závislost charakteristických veličin stroje na výkonu motoru. Provádí se při konstantním napájecím napětí  $U_n$ , kdy hřídel postupně zatěžujeme dynamometrem v rozptylu od  $1,5P_n$  do  $0P_n$ .

### 1.5 Náhradní schéma asynchronního stroje



Obr. 8 Náhradní schéma asynchronního stroje [14]

Náhradní schéma se kreslí pro jednu fázi a jsou v něm obsaženy všechny klíčové obvodové prvky, představující jednotlivé součásti asynchronního stroje. Podélná větev zohledňuje vinutí a rozptylové reaktance statoru a rotoru ( $R_s$ ,  $R'_r$ ,  $X_{\sigma s}$ ,  $X'_{\sigma r}$ ), příčná pak magnetizační reaktanci  $X_\mu$  a odpor  $R_{Fe}$ , zohledňující ztráty v železe.

## **2 Asynchronní stroj jako generátor elektrické energie**

### **2.1 Provoz asynchronního stroje v generatorickém režimu**

Pakliže vnějším zdrojem momentu roztočíme rotor asynchronního stroje do nadsynchronních otáček ( $s < 0$ ), dostáváme se na momentové charakteristice do generatorické oblasti, stator se stává kotvou a indukuje se na něm napětí vlivem točivého magnetického pole rotoru. Na svorkách vzniká napětí, po připojení zátěže protéká proud. Předpokladem pro takovýto provoz je však jalová energie, která musí být stroji dodávána buď ze sítě, nebo kondenzátorových baterií z důvodu vybuzení magnetického pole. Asynchronní generátory jsou využívány pro menší výkony (řádově desítky kW, max. 200kW) ve vodních elektrárnách nebo v pomaloběžném provedení (velký počet pólů) u větrných elektráren. Asynchronní generátor má minimální požadavky na regulační systémy, proto mohou být takové elektrárny provozovány jako bezobslužné, opatřené pouze jištěním proti proudovému přetížení. [3]

Rovněž je zapotřebí chránit stroj před příliš velkými otáčkami rotoru, které mohou vzniknout v případě, že se zatížení sítě, do které alternátor pracuje, zmenší pod úroveň výkonu hnacího motoru asynchronního generátoru. Otáčky se budou zvyšovat a mohou dosáhnout hodnot, kdy hrozí poškození zařízení. Podobný jev může nastat při zkratu v síti. Asynchronní alternátor ztrácí buzení, jeho elektromagnetický moment, působící proti momentu hnacího motoru, je téměř nulový a proto se začne soustrojí zrychlovat.

Neduhem asynchronního generátoru je relativně nízký účinník ( $\cos\varphi \approx 0,75$ ), proto vyžaduje určitou kapacitní kompenzaci. [2]

Pro praktickou aplikaci asynchronního generátoru je vhodné volit stroj s co možná největším počtem pólových dvojic z důvodu snížení synchronních a tedy provozních jmenovitých otáček nutných pro fungování stroje. V návaznosti na nízké provozní otáčky vzniká potíž s chlazením stroje a je tedy potřeba zajistit jeho chlazení jiným způsobem než ventilátorem montovaným na hřídel stroje, jak tomu bývá obvykle. Vzhledem ke konstrukčním omezením a skutečnosti, že mnohapólový asynchronní stroj by byl finančně náročný, je vhodné volit stroj se dvěma až třemi pólovými dvojicemi, neboť synchronní otáčky nejsou příliš vysoké a chlazení zajistí i vestavěný ventilátor. [4]

### **2.2 Asynchronní generátor pracující do veřejné sítě**

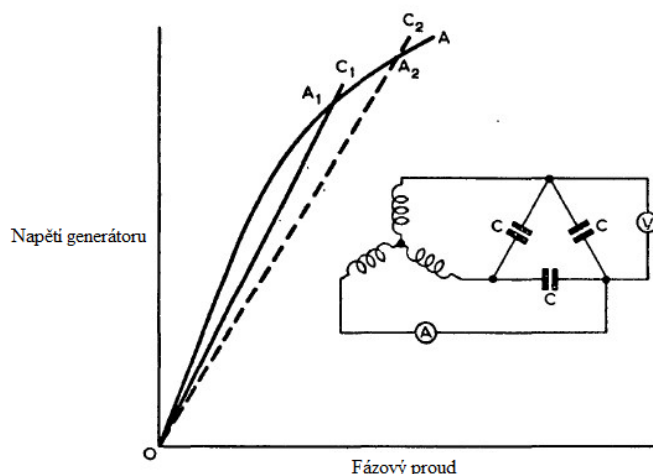
Připojení samotného asynchronního stroje do veřejné sítě může být provedeno dvěma způsoby. Buďto stroj rozbíháme hnacím zařízením do lehce nadsynchronních otáček, kdy je generátor odpojen od sítě a postupuje se podle předem daných podmínek fázování uvedených dále, nebo, jak je tomu např. u malých vodních elektráren, připojením asynchronního motoru k síti, jeho následným roztočením do jmenovitých otáček a vpuštěním vody na turbínu, připojenou na hřídel motoru. Vlivem protékající vody roztočí turbína motor do nadsynchronních otáček a stroj změnil smysl toku činného proudu, dodává do sítě výkon a bere si jalový magnetizační proud. V takovém případě není potřeba splnění podmínek fázování, protože stroj je přirozeně rozběhnut trojfázovou sítí, do které je připojen.

### **2.3 Asynchronní generátor v ostrovním režimu**

Vzhledem k nemožnosti dodávky jalové energie ze sítě je zapotřebí zajistit jalovou energii ve formě kondenzátorových baterií připojených k vinutí statoru. Tyto baterie je nutno správně navrhnout tak, aby dodávaly adekvátní jalový výkon, což bude blíže rozebráno v pozdějších kapitolách.

## 2.4 Buzení asynchronního stroje

Protože v rámci experimentu budu simulovat fázování asynchronního generátoru na síť bez přirozeného rozběhu, je potřeba se zabývat i buzením samotného stroje, aby byl schopen dodávat napětí na hladině, která je daná sítí, v našem případě 400/230V a dodržet tedy jednu z podmínek fázování. K tomu potřebuje asynchronní generátor jalovou energii, která je mu dodána zapojením budicích kondenzátorů ke statorovému vinutí. Generované napětí závisí na otáčkách a kapacitě připojených kondenzátorů, což ukazuje charakteristika na obr. 9, kde je znázorněna charakteristika naprázdno asynchronního motoru (A) společně s charakteristikou kapacitancí ( $C_1$ ;  $C_2$ ). Generované napětí bude odpovídat průsečíku bodů  $A_1C_1$ , při zvýšení kapacity pak průsečíku bodů  $A_2C_2$ . [10]



Obr. 9 Nabuzení asynchronního stroje [10]

## 2.5 Fázování

Fázováním nazýváme proces sepnutí dvou nesynchronizovaných částí sítě. Tuto problematiku je nutné řešit obzvláště u generátorů vysokých výkonů, které při nesprávném připojení k síti mohou způsobit velké problémy, v nejhorším případě i blackout velké části elektrizační soustavy. Fázování se v dnešní době provádí zpravidla dvěma způsoby - **fázováním přesným** anebo **fázováním asynchronním**. K tomu aby bylo možné připojit generátor do sítě způsobem přesného fázování, je zapotřebí dodržet určité podmínky. Tyto podmínky jsou:

- Stejné napětí generátoru a sítě ( $U_G = U_S$ )
- Ideálně nulový fázový posun mezi  $U_G$  a  $U_S$
- Stejný kmitočet  $U_G$  a  $U_S$
- Stejný sled fází [12]

Podmínky musí být z hlediska stroje dodrženy z důvodu omezení proudových rázů a elektromechanického vyrovnávacího proudu. Spolehlivého fázování je možné dosáhnout použitím elektronických sledovačů fází, tzv. synchronoskopy, které se o připojení generátoru postarají automaticky, nebo použitím manuálních metod. Mezi tyto metody patří fázování na světlo/tmu, kdy se za použití žárovek, připojených na všechny tři fáze sleduje, zda žárovky svítí nebo naopak zhasnou. Žárovky jsou zapojeny rozdílně v případě fázování na tmou či světlo. Další manuální metodou je použití dvoukanalového osciloskopu, kdy jeden kanál je připojen na fázi generátoru a druhý na příslušnou fázi sítě. Metodu s osciloskopy využijí pro experimentální fázování asynchronního generátoru k síti. [13]

### 3 Měření charakteristických parametrů asynchronního stroje

#### 3.1 Použitá zařízení

Elektromotor Siemens 1LE1002-1AB42-2AB0 (SN: 58508100400009)

**Tab. 1 Štítkové údaje asynchronního motoru**

$U_n$ [V]	$I_n$ [A]	$P_n$ [kW]	$\cos\varphi_n$ [-]	$n_n$ [ $\text{min}^{-1}$ ]	$\eta_n$ [%]
400/230	4,9/8,6	2,2	0,81	1425	79,7

Asynchronní dynamometr/tenzometr ASD 5000

**Tab. 2 Štítkové údaje asynchronního dynamometru**

$U_n$ [V]	$I_n$ [A]	$P_n$ [kW]	$n_n$ [ $\text{min}^{-1}$ ]
260	15,3	5	2900

Měřicí přístroj MAGTROL 6530 Power analyzer

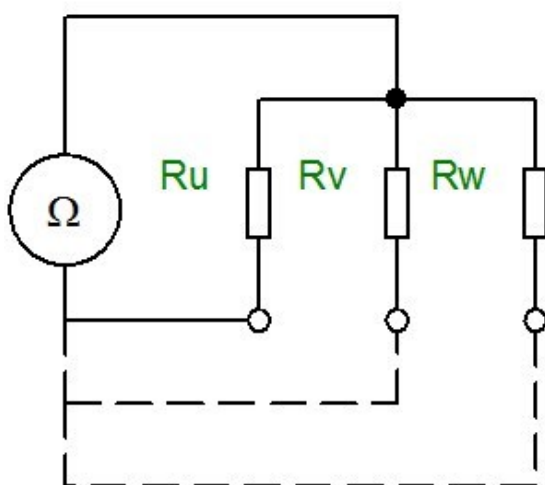
#### 3.2 Měření odporu statorového vinutí

Pro výpočet prvků náhradního schématu, konkrétně pak odporu rotorového vinutí je nutné znát ohmickou hodnotu odporu statoru, neboť z měření nakrátko získáme pouze hodnotu impedance celé podélné větve bez rozlišení statoru a rotoru. Výpočet odporu rotoru je možné provést takto:

$$R'_{r'} = R_{kN} - R_s \quad (13)$$

Kde  $R_{kN}$  je jmenovitý odpor nakrátko a  $R_s$  odpor statoru.

Vzhledem k tomu, že jsme pro zjednodušení měření odporu vinutí použili zapojení vinutí do hvězdy s vyvedeným středem, mohli jsme přímo změřit fázové hodnoty statorového vinutí dle schématu (Viz. Obr. 10).



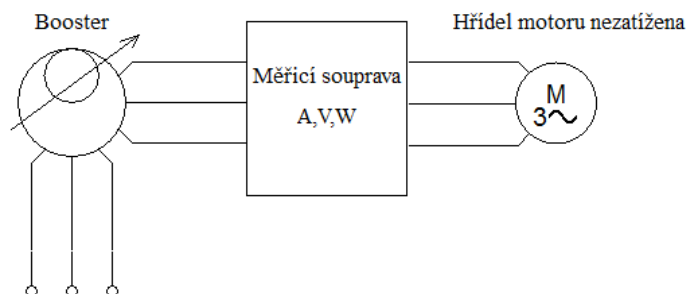
**Obr. 10 Schéma měření statorového vinutí**

**Tab. 3 Naměřené hodnoty odporu vinutí**

$R_U$ (Ω)	$R_V$ (Ω)	$R_W$ (Ω)
3,16	3,05	3,12

### 3.3 Charakteristika naprázdno

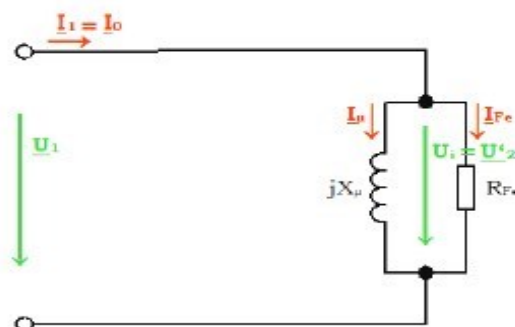
#### 3.3.1 Schéma zapojení



Obr. 11 Blokové schéma měření naprázdno

#### 3.3.2 Teoretický rozbor

Účelem měření charakteristiky naprázdno je určení základních prvků náhradního schématu a s nimi souvisejících ztrát. Při měření naprázdno je hřídel motoru nezatížena a ve vztahu k náhradnímu schématu stroje se uplatňuje pouze jeho příčná větev (obr. 12), protože sekundární stranou náhradního schématu teče nulový proud. Ve stavu naprázdno je také možno zanedbat podélnou větev primární strany, neboť její impedance je řádově menší než impedance příčné větve ( $R_1 + jX_{\sigma 1}$ ). [6]



Obr. 12 Náhradní schéma jedné fáze AM ve stavu naprázdno [6]

#### 3.3.3 Postup měření

Jak již bylo zmíněno, charakteristika naprázdno se měří bez zatížení motoru od 130 do 30% jmenovitého napětí  $U_n$ , v mém případě od 480 do 120V. Ze zaznamenaných hodnot napětí a proudu jsem dopočetl prvky příčné větve náhradního schématu potřebné pro simulaci v programu ATP-EMTP. Zkouška se tedy provádí za účelem zjištění proudu a účinníku na prázdno, ztrát v železe, mechanických ztrát a určení prvků příčné větve náhradního schématu, magnetizační reaktance  $X_\mu$  a odporu zohledňující hysterezní ztráty a ztráty vířivými proudy  $R_{Fe}$ . [11]

#### 3.3.4 Naměřené hodnoty

(Viz. Příloha I)

#### 3.3.5 Vypočtené hodnoty

(Viz. Příloha II)

### 3.3.6 Příklady výpočtu

Pro výpočet prvků náhradního schématu je potřeba stanovit hodnotu proudu naprázdno z měřených fázových. Výpočet celkového proudu naprázdno provádím jako aritmetický průměr jednotlivých fázových hodnot. Pro jmenovitou hodnotu napětí z korespondujících proudů stanovím jmenovitý proud naprázdno.

$$I_{0n} = \frac{I_1 + I_2 + I_3}{3} = \frac{3,35 + 3,36 + 3,32}{3} = 3,34 \text{ A} \quad (14)$$

### 3.3.7 Výpočet prvků náhradního schématu z měření naprázdno

Vzhledem k tomu, že u měření charakteristik naprázdno lze zanedbat nebo se vůbec neuvažuje s podélnou větví, mohu bezpečně a s relativně malou chybou, vypočítat odpor reprezentující ztráty magnetického obvodu  $R_{Fe}$  a magnetizační reaktanci  $X_\mu$ .

Pro výpočet odporu  $R_{Fe}$  jsem využil Ohmova zákona:

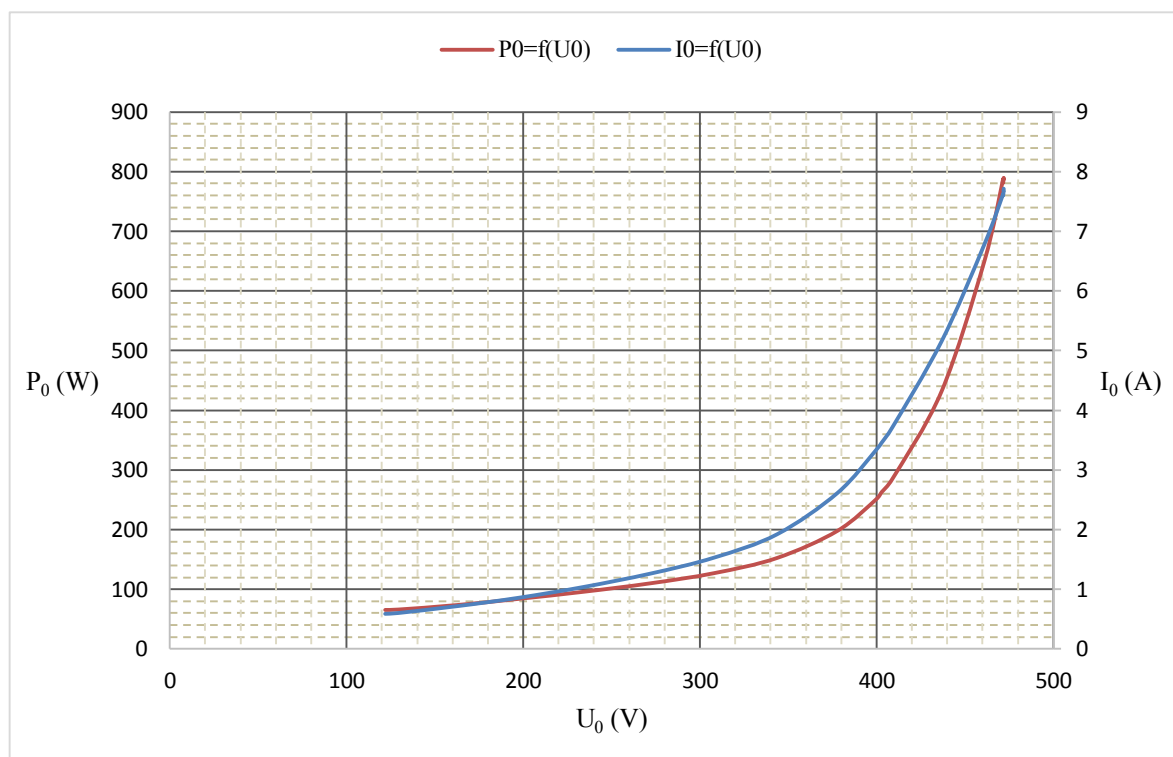
$$R_{Fe} = \frac{U_{sn}}{\sqrt{3} \cdot I_{Fe}} = \frac{U_{sn}}{\sqrt{3} \cdot I_{0n} \cdot \cos \varphi_0} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 3,34 \cdot 0,11} = 628,58 \Omega \quad (15)$$

Pro magnetizační reaktanci z Ohmova zákona platí:

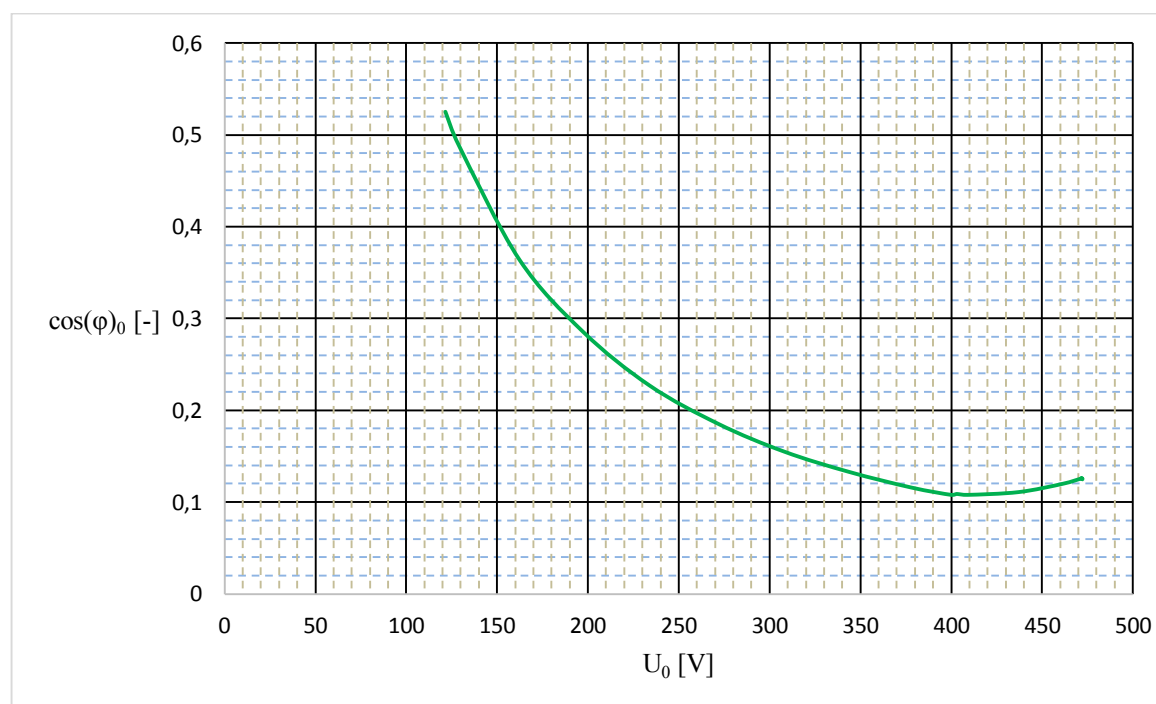
$$X_\mu = \frac{U_{sn}}{\sqrt{3} \cdot I_\mu} = \frac{U_{sn}}{\sqrt{3} \cdot I_{0n} \cdot \sin \varphi_0} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 3,34 \cdot \sin(\arccos(0,11))} = \frac{230,94}{3,34 \cdot 0,994} = 69,56 \quad (16)$$

$\Omega$

### 3.3.8 Grafy



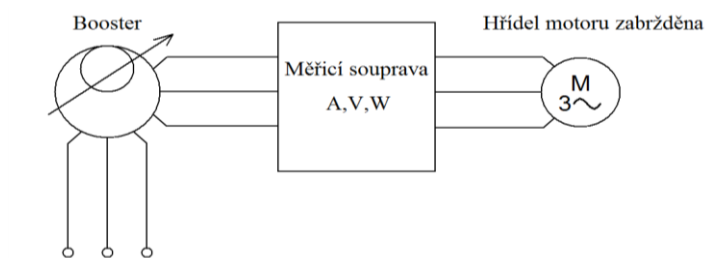
Obr. 13 Charakteristiky naprázdno [ $P_0; I_0=f(U_0)$ ]



Obr. 14 Charakteristika naprázdno [ $\cos\varphi_0=f(U_0)$ ]

## 3.4 Charakteristika nakrátko

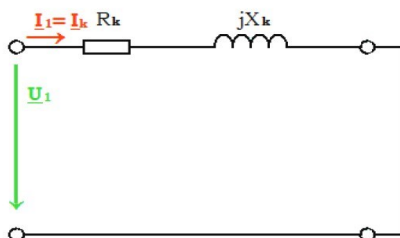
### 3.4.1 Schéma zapojení



Obr. 15 Blokové schéma měření nakrátko

### 3.4.2 Teoretický rozbor

Charakteristikou stroje nakrátko je možné určit dle proudu nakrátko či ztrát, zbylé prvky náhradního schématu tedy prvky podélné větve což znamená odpor podélné větve náhradního schématu  $R_K$  a rozptylovou reaktanci  $X_K$ . Zatímco u měření naprázdno je hřídel nezatížena a běží volně, u měření nakrátko je potřeba hřídel zablokovat. Při této zkoušce stroje se neodebírá ani nedodává žádná mechanická energie, celý dodávaný příkon se tedy spotřebuje na krytí ztrát, které se mění ve stroji na teplo. Vzhledem k tomu, že při připojení jmenovitého napětí vinutím stroje protéká několikanásobně vyšší proud oproti jmenovitému a jeho energie se ve stroji mění na teplo, může dojít k tepelnému poškození izolace stroje. Z tohoto důvodu se zkouška provádí při sníženém napětí tak, aby proud nakrátko nepřesahoval hodnotu proudu jmenovitého.[11]



Obr. 16 Náhradní schéma jedné fáze asynchronního motoru nakrátko [6]

### 3.4.3 Postup měření

Měření se provádí při sníženém napětí, aby se zamezilo tepelnému poškození izolace stroje. Hřídel motoru je zablokována. Vzhledem k tomu, že charakteristiky nakrátko jsou téměř lineární, postačí změřit několik bodů pro hodnoty proudu v rozmezí 120% až 30% jmenovitého proudu  $I_n$ . Z naměřených hodnot odečítám pro jmenovitou hodnotu proudu odpovídající napětí nakrátko a počítám impedanci podélné větve náhradního schématu asynchronního stroje za účelem stanovení jednotlivých prvků, tedy činného odporu podélné větve  $R_K$  a rozptylové reaktance  $X_K$ , potřebné pro simulaci v programu ATP-EMTP.

### 3.4.4 Naměřené hodnoty

(Viz. Příloha III)



### 3.4.5 Příklady výpočtu

Podobně jako u měření naprázdno, i zde bylo potřeba vyjádřit z naměřených fázových proudů celkový proud nakrátko. Rovněž vypočítám jako aritmetický průměr z proudů, které při sníženém napětí korespondovaly proudu jmenovitému.

$$I_k = \frac{I_1 + I_2 + I_3}{3} = \frac{4,839 + 4,995 + 5,023}{3} = 4,96 \text{ A} \quad (17)$$

Dále je nutné vypočítat z proudu nakrátko  $I_k$  jmenovitý proud nakrátko  $I_{kN}$ , neboť potřebuji znát hodnotu proudu, který by strojem protékal v případě, že by se nejednalo o zkoušku, kdy je stroj napájen sníženým napětím, ale byl by připojen na napětí jmenovité.

$$I_{kN} = I_k \frac{U_n}{U_k} = 4,96 \cdot \frac{400}{88,259} = 22,47 \text{ A} \quad (18)$$

Následně ze jmenovitého napětí a proudu nakrátko vypočtu impedanci podélné větve náhradního schématu.

$$Z_{kN} = \frac{U_n}{I_{kN}} = \frac{230}{22,47} = 10,236 \Omega \quad (19)$$

### 3.4.6 Výpočet prvků náhradního schématu z měření nakrátko

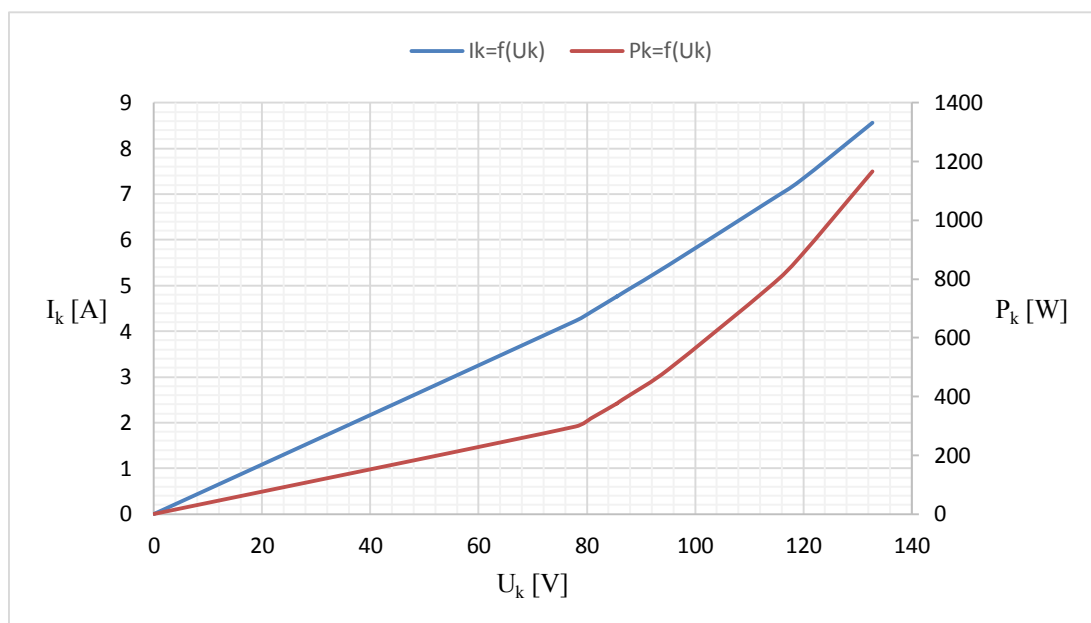
Pro získání jednotlivých impedančních složek, tedy mnou hledaného odporu  $R_k$  a reaktance  $X_k$  násobím impedanci účíníkem nakrátko a sinem úhlu  $\varphi$  účíníku nakrátko.

$$R_{kN} = Z_{kN} \cdot \cos \varphi_k = 10,236 \cdot 0,54 = 5,527 \Omega \quad (20)$$

$$\varphi_k = \arccos(\cos \varphi_k) = \arccos(0,54) = 57,316^\circ \quad (21)$$

$$X_{kN} = Z_{kN} \cdot \sin \varphi_k = 10,236 \cdot \sin(57,316^\circ) = 8,615 \Omega \quad (22)$$

### 3.4.7 Grafy



Obr. 17 Signifikantní charakteristiky stroje nakrátko

## 4 Simulace fázování v ATP-EMTP

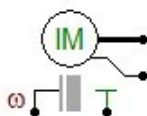
### 4.1 O programu

ATP-EMTP (Alternative Transients Program – ElectroMagnetic Transients Program) je software určený k simulaci přechodových jevů v elektrotechnice obecně a jejich následnému vyhodnocování. Jeho přednost spočívá v relativní jednoduchosti vkládání dat do simulačního programu díky předem definovaným funkcím a modelům různých zařízení a prvků elektrizační soustavy a elektrotechniky. Zároveň díky grafickému postprocesoru PLOTXY, umožňuje program ATP-EMTP flexibilní a pohodovou práci s jak samotným simulačním obvodem, tak i jeho vyhodnocováním.

### 4.2 Simulační model

#### 4.2.1 Nastavení prvku asynchronního stroje

V předchozích kapitolách (3.3;3.4) jsem na základě měření nakrátko, naprázdno, stanovil jednotlivé prvky náhradního schématu, které nyní použiji pro nastavení samotného modelu asynchronního stroje v programu ATP. Pro simulaci jsem použil model asynchronního stroje UM3 (Obr. 18).



Obr. 18 Model asynchronního stroje UM3

Základním nastavením modelu je stanovení počtu pólů, frekvence a základních měřených veličin stroje (Obr. 19).

Attributes

General Magnet Stator Rotor Init

Stator coupling: Y

Pole pairs: 2

Rotor coils: d: 1 q: 1

Frequency: 50

Global: ☒ Automatic ☒ Prediction

Tolerance: 0.1885

NODE	PHASE	NAME
Stator	ABC	×0002
M_NODE	1	×0006
BUSM	1	×0008
Neut	1	

Order: 0 Label:

Comment:

Output: TQOUT (0, 1, 2, 3) OMOUT (0, 1, 2, 3) THOUT ☐ CUPR ☒

Hide

Obr. 19 Základní nastavení paramterů modelu UM3

Zbytek nastavení, tedy specifikace parametrů magnetického obvodu, statorového a rotorového vinutí, vychází ryze z vypočtených hodnot prvků náhradního schématu, které je ovšem potřeba upravit, neb prvky mnou vypočteny jsou obecně vztaženy na příčnou a podélnou větev. Je tedy namístě vyčlenit z těchto celkových parametrů ty specifické pro jednotlivé prvky náhradního schématu.

Magnetický obvod je zohledněn pod záložkou „Magnet“ a požaduje hodnoty indukčnosti v magnetizační ose D a Q. Předpokládám konstantní velikost vzduchové mezery, tudíž pro obě tyto hodnoty platí z rovnice (23):

$$L_{\mu} = \frac{X_{\mu}}{\omega} = \frac{69,56}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0,2214 \text{ H} \quad (23)$$

Pro vinutí statoru platí aritmetický průměr hodnot ohmického odporu vinutí naměřených za studena (viz. Příloha I), tedy:

$$R_s = \frac{R_U + R_V + R_W}{3} = \frac{3,16 + 3,05 + 3,12}{3} = 3,11 \Omega \quad (24)$$

Ohmickou hodnotu odporu vinutí rotoru získám jako rozdíl vypočteného odporu nakrátko  $R_k$  a odporu statoru  $R_s$ . Platí tedy:

$$R_r = R_{kN} - R_s = 5,527 - 3,11 = 2,417 \Omega \quad (25)$$

Rovněž je nutné vypočítat indukčnost poloviny rozptylové reaktance podélné větve (poloviny z důvodu aproximace rozptylové reaktance statoru a rotoru, je třeba je rozlišit):

$$L_{\sigma} = \frac{X_{kN}}{\omega} = \frac{\frac{8,615}{2}}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0,0137 \text{ H} \quad (26)$$

Hodnota rozptylové indukčnosti je společná jak pro stator, tak i pro rotor, protože uvažuji poloviční velikost celkové rozptylové reaktance jak v rotoru, tak ve statoru. Samotné zadání parametrů do simulačního modelu bude vypadat takto:

The image shows three overlapping windows from a simulation software interface, likely MATLAB/Simulink, for setting parameters of a motor model (UM3).

- Magnet Window:**
  - LMUD: 0.22142
  - LMUQ: 0.22142
  - Saturation: ☒ none, ☐ d, ☐ q, ☐ both, ☐ symm
- Stator Window:**

	R [ohm]	L [H/pu]
0	0	0
d	3.11	0.0137
q	3.11	0.0137
- Rotor Window:**

	R [ohm]	L [H/pu]
1	2.417	0.0137
2	2.417	0.0137

**Obr. 20** Nastavení parametrů obvodových prvků náhradního schématu simulačního modelu UM3

Pod záložkou init (Obr. 20) se skrývá nastavení počáteční hodnoty skluzu, kdy pro můj případ volím 0.

#### 4.2.2 Návrh budicí kapacity

V rámci simulace i experimentu budu fázovat asynchronní generátor k síti až po jeho rozběhnutí pomocí dynamometru, tedy bez prvotního přirozeného rozběhu stroje připojením na síť. Je nutné proto navrhnout odpovídající budicí kapacitu, která bude paralelně připojena k vinutí statoru (zátěži), za účelem dodání dostatečného jalového výkonu, aby stroj generoval napětí na dané napěťové úrovni sítě, do které bude fázován.

Potřebnou velikost kapacity lze stanovit použitím ohmova zákona a magnetizačního proudu získaného z měření nakrátko.

Obecně platí:

$$U = X_C \cdot I \quad (27)$$

Pro můj případ:

$$U_f = X_C \cdot I_\mu = \frac{1}{\omega \cdot C} \cdot I_0 \cdot \sin(\varphi_0) \quad (28)$$

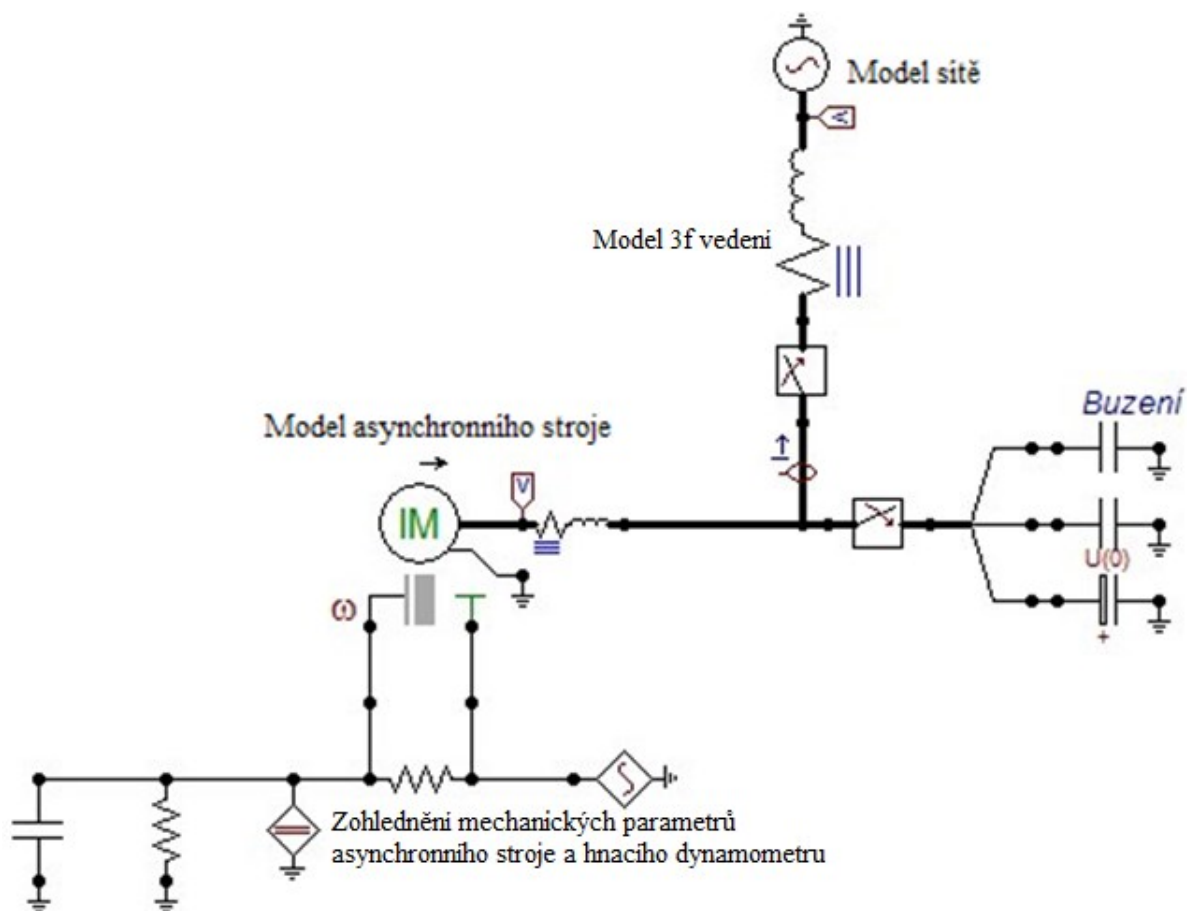
Odkud vyjádřím hodnotu budicí kapacity C:

$$C = \frac{I_0 \cdot \sin \varphi_0}{\omega \cdot U_f} = \frac{I_\mu}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot U_f} \quad (29)$$

Pro konkrétní hodnoty získané z měření naprázdno hodnota kapacity činí:

$$C = \frac{3,318}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 230} = 45,924 \cdot 10^{-6} F = 45,924 \mu F \quad (30)$$

### 4.2.3 Kompletní simulační model

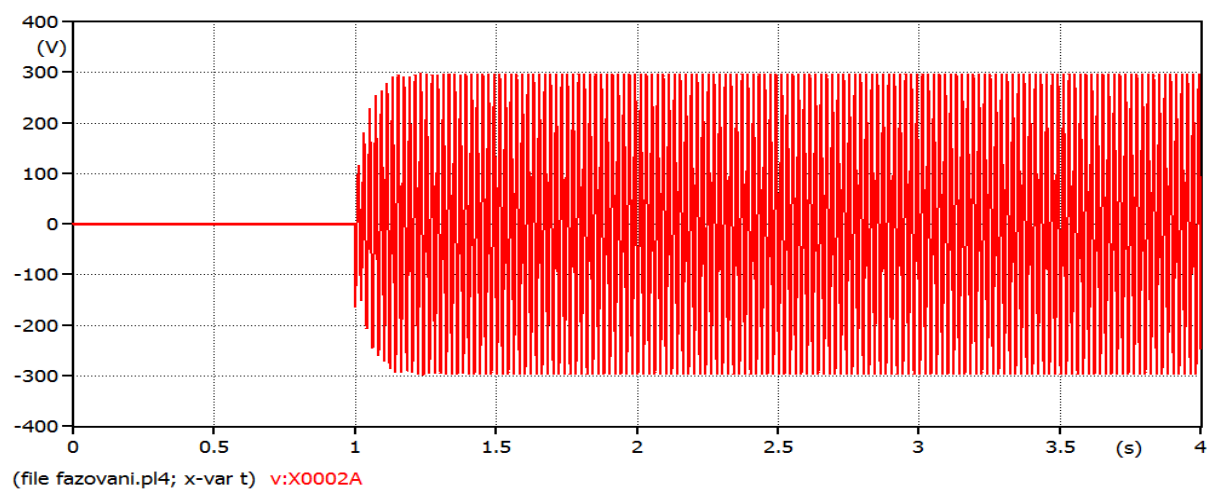


Obr. 21 Simulační model fázování asynchronního generátoru k síti

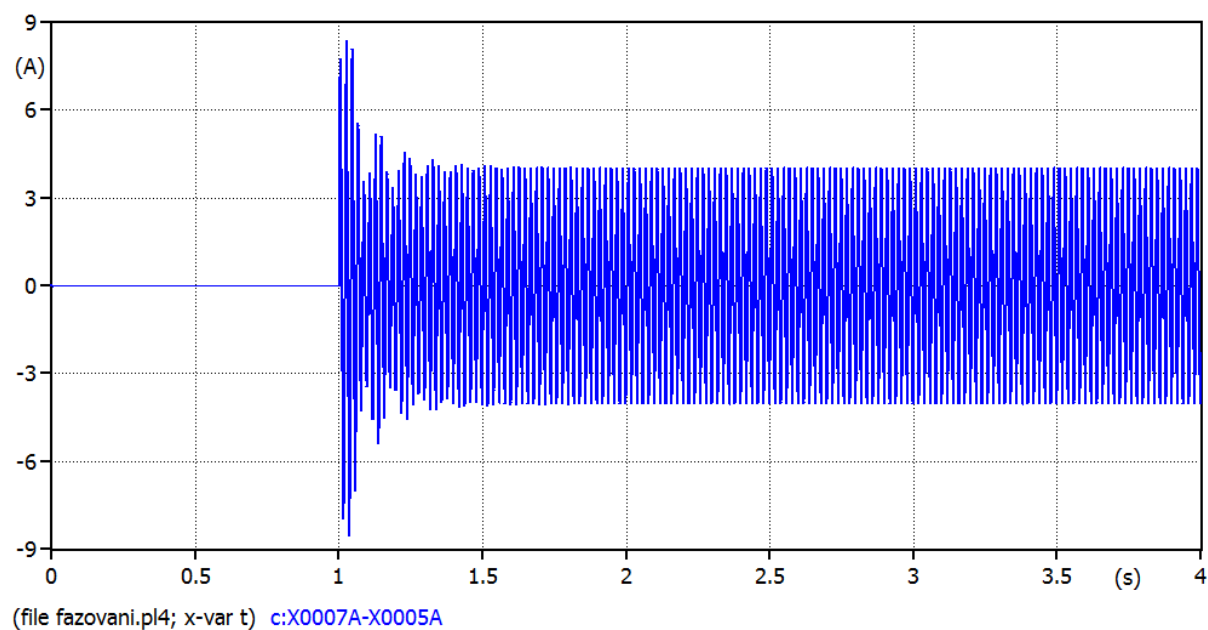
Simulací budu zjišťovat, jak se chová napětí na svorkách asynchronního generátoru při připojení a odpojení budicím obvodu, proudové špičky při sepnutí spínače připojujícím generátorový systém k modelu sítě (přifázování) a testovat různé časové momenty fázování za účelem stanovení nejlépe vyhovujícího času pro připojení.

## 4.3 Výstupy ze simulace

### 4.3.1 Příklad 1

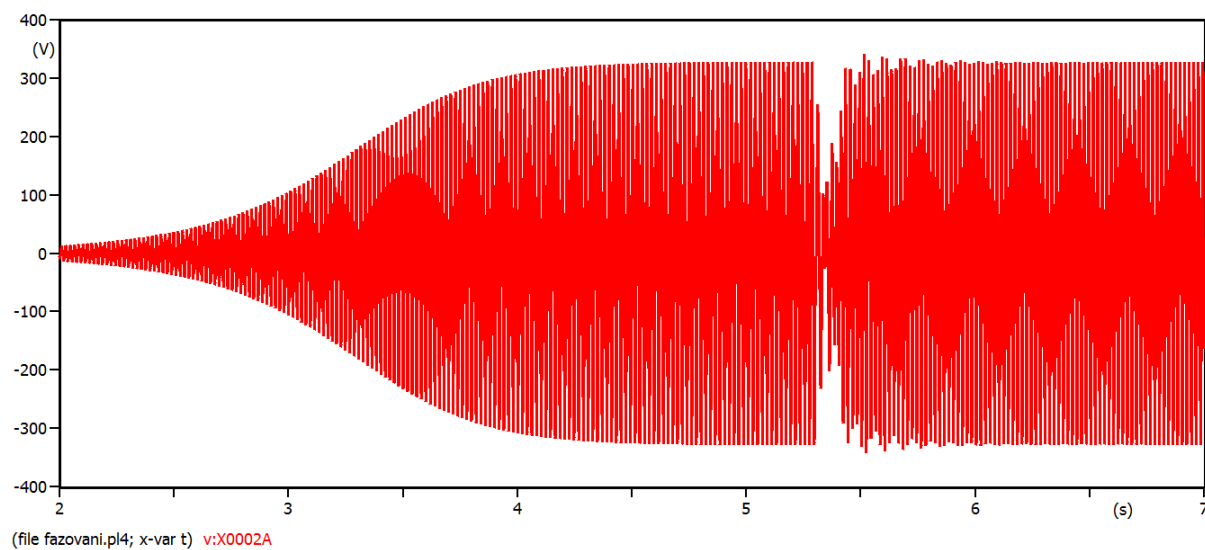


Obr. 22 Průběh napětí jedné fáze na svorkách generátoru při nenabuzeném stroji s časem sepnutí  $t=1$ s

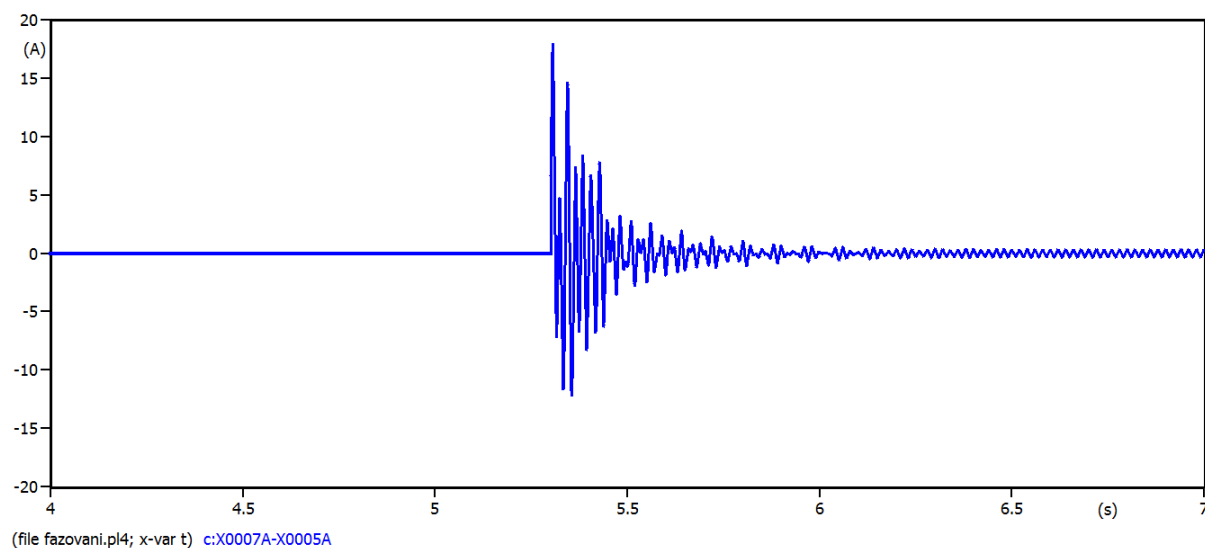


Obr. 23 Průběh proudu jedné fáze při nenabuzeném stroji s časem sepnutí  $t=1$ s

### 4.3.2 Příklad 2

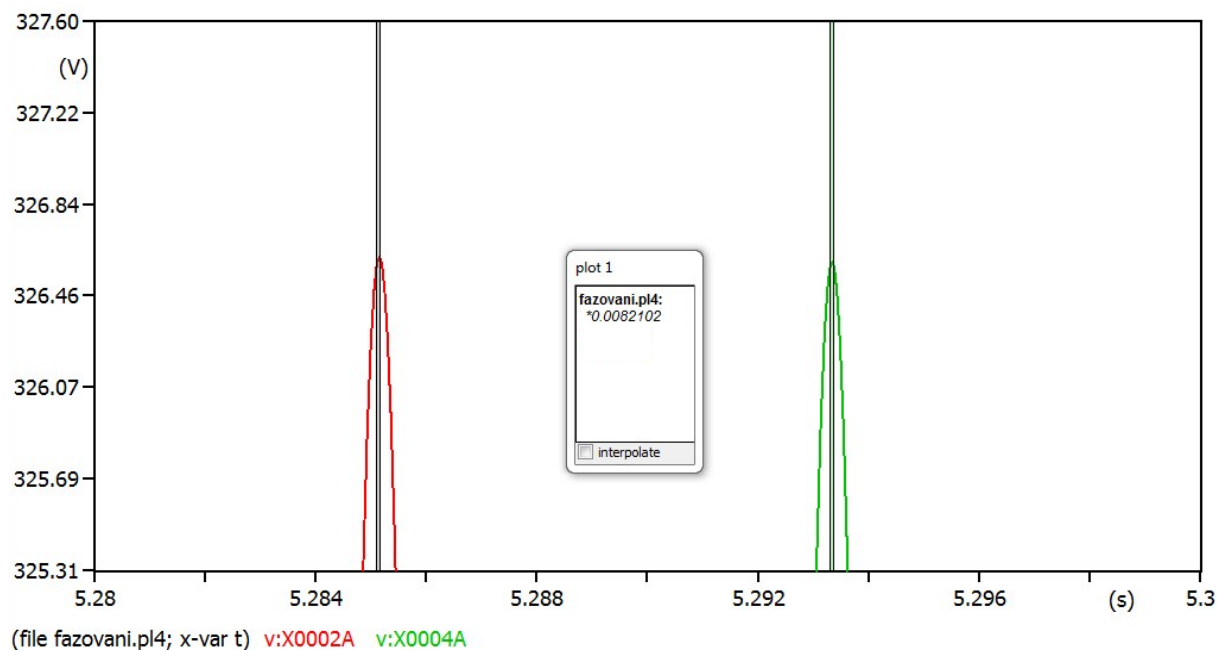


Obr. 24 Průběh napětí jedné fáze při fázování nabuzeného generátoru s časem sepnutí v  $t=5,3s$



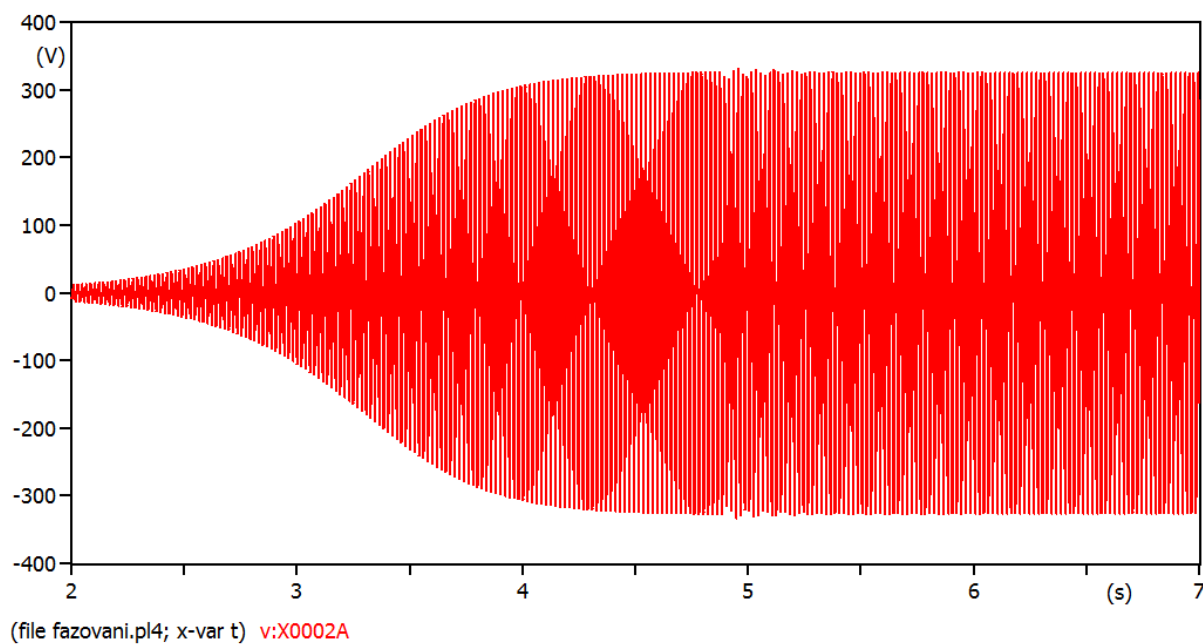
Obr. 25 Průběh proudu jedné fáze při fázování nabuzeného generátoru s časem sepnutí v  $t=5,3s$



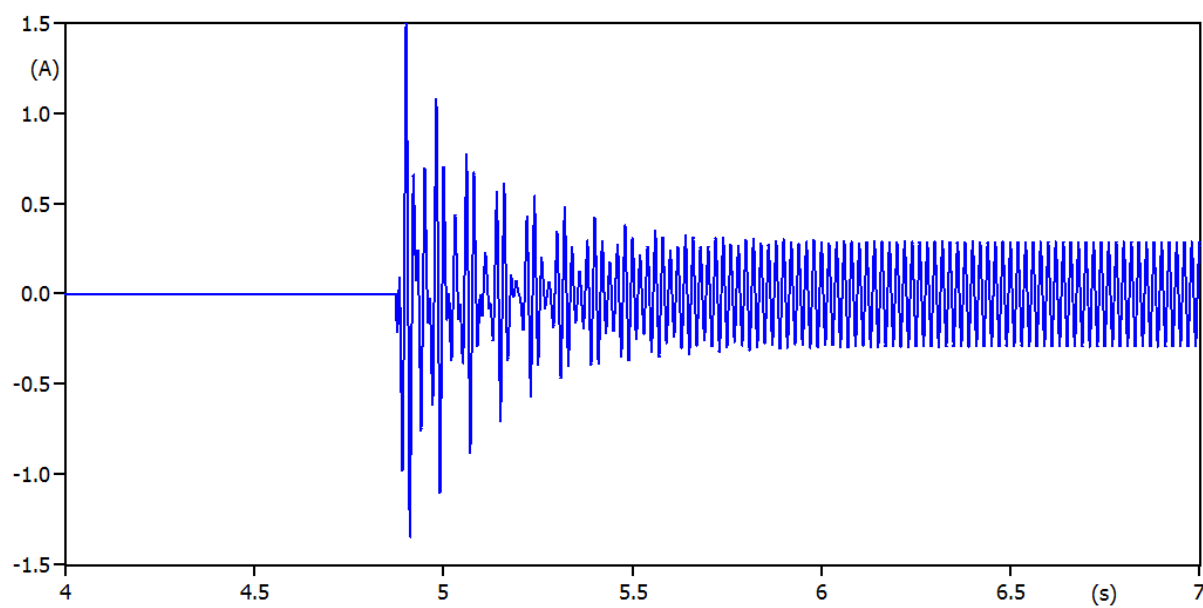


Obr. 26 Detail odečtu časového zpoždění napětí těsně před přifázováním

#### 4.3.3 Případ 3

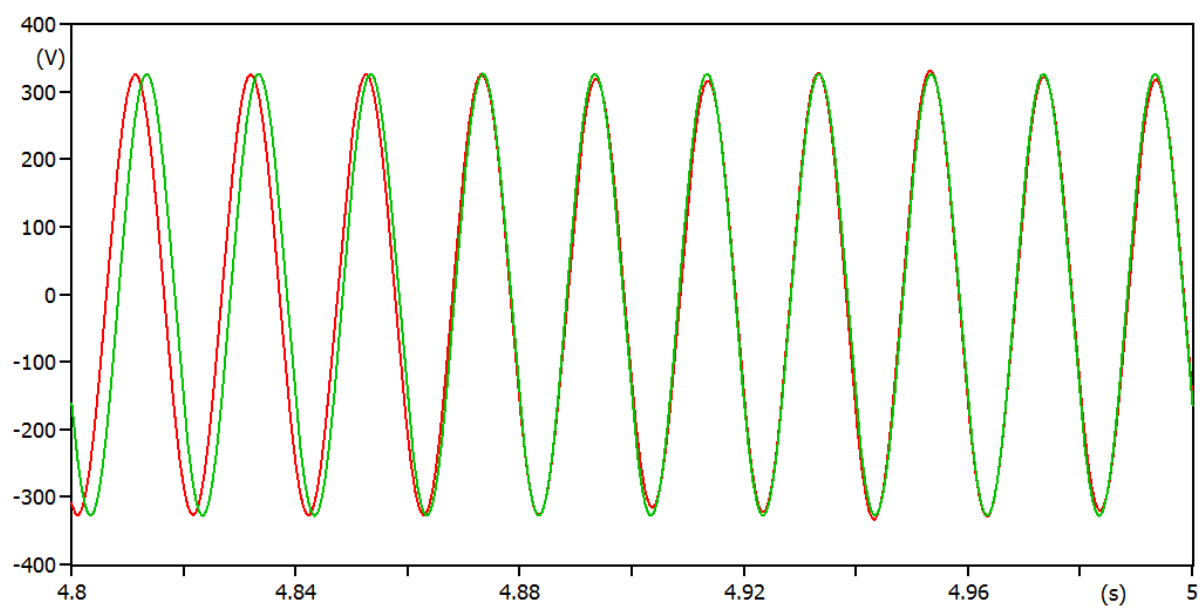


Obr. 27 Průběh napětí jedné fáze při fázování nabuzeného generátoru s časem sepnutí v  $t=4,8731s$



(file fazovani.pl4; x-var t) c:X0007A-X0005A

**Obr. 28** Průběh proudu jedné fáze při fázování nabuzeného generátoru s časem sepnutí v  $t=4,8731$  s

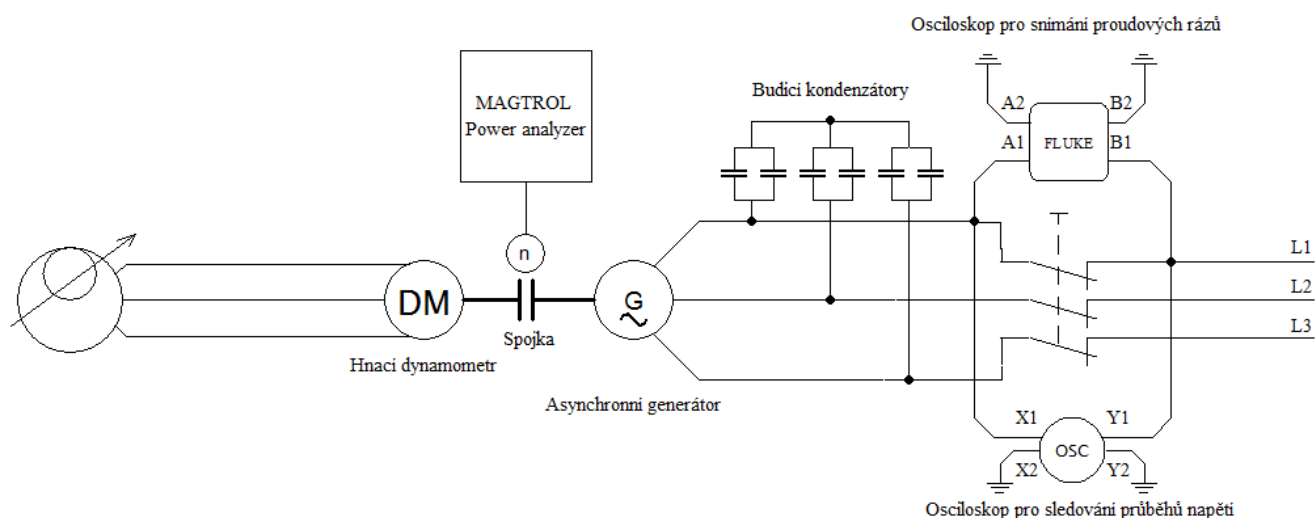


(file fazovani.pl4; x-var t) v:X0002A v:X0004A

**Obr. 29** Detail průběhů napětí jedné fáze s časem sepnutí v  $t=4,8731$  s

## 5 Experimentální fázování stroje k síti

### 5.1.1 Schéma zapojení



Obr. 30 Schéma zapojení experimentálního přifázování stroje k distribuční síti 400/230V

### 5.1.2 Teoretický rozbor

Fázování, jak již bylo zmíněno v kapitole 2.5, je proces připojení dvou nesynchronizovaných částí sítě. Pro experiment jsem zvolil případ, kdy je stroj, roztočený na nadsynchronní otáčky s připojeným buzením, manuálně připnut stykačem k síti. K tomu je nutné splnit podmínky fázování, rovněž kapitola 3.5.

### 5.1.3 Použitá zařízení

Elektromotor Siemens 1LE1002-1AB42-2AB0 (SN: 58508100400009)

Tab. 4 Štítkové údaje asynchronního motoru

$U_n$ [V]	$I_n$ [A]	$P_n$ [kW]	$\cos\varphi_n$ [-]	$n_n$ [ $\text{min}^{-1}$ ]	$\eta_n$ [%]
400/230	4,9/8,6	2,2	0,81	1425	79,7

Asynchronní dynamometr/tenzometr ASD 5000

Tab. 5 Štítkové údaje asynchronního dynamometru

$U_n$ [V]	$I_n$ [A]	$P_n$ [kW]	$n_n$ [ $\text{min}^{-1}$ ]
260	15,3	5	2900

Kondenzátorová baterie 3x30+3x16 $\mu$ F

Měřicí přístroj MAGTROL 6530 Power analyzer

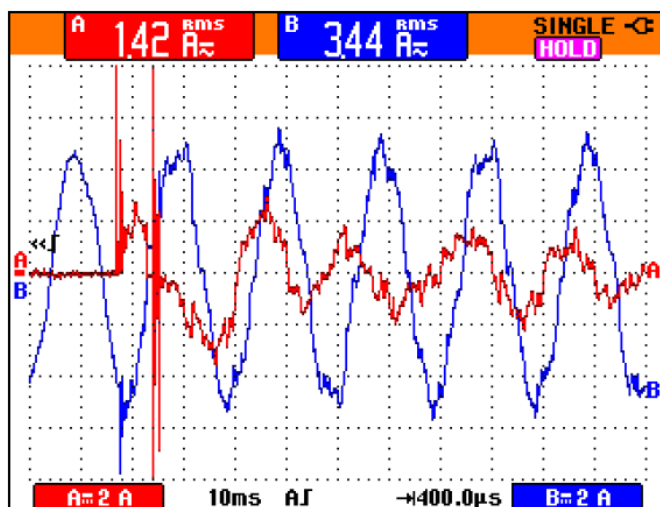
Přenosný osciloskop FLUKE 199C

Digitální osciloskop VOLTcraft DSO 4062A

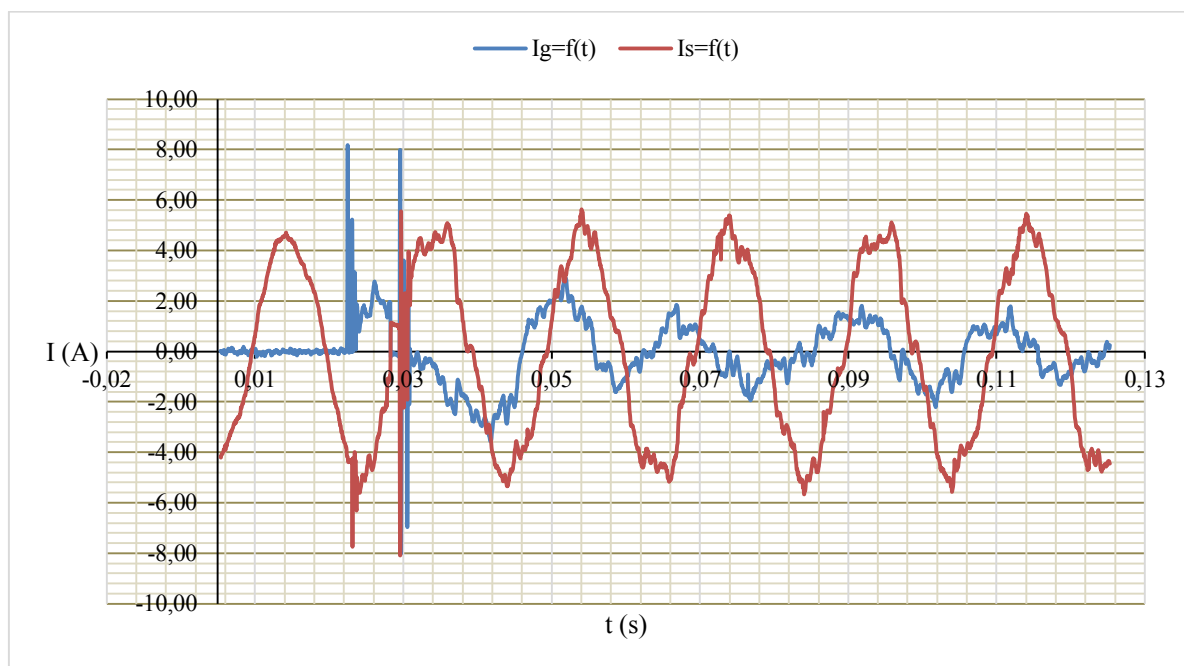
#### 5.1.4 Postup měření

Asynchronní generátor bude fázován na síť způsobem, kdy je stroj roztočen dynamometrem na lehce nadsynchronní otáčky tak, aby bylo dosaženo požadované hodnoty napětí, tedy napět'ové hladiny sítě. V momentě dosažení tohoto bodu sledují průběhy napětí sítě a generátoru a ve vhodný okamžik spínám stykač. Sledování fázového posuvu a shodnosti napětí sítě a generátoru je v experimentu provedeno pomocí dvoukanálového osciloskopu, kdy jeden snímá průběh fázového napětí fáze L1 a druhý snímá napětí korespondující fáze generátoru. V momentě, kdy se křivky překrývají, je možné sepnout stykač a přifázovat stroj k síti s minimálním momentovým a proudovým rázem. Přenosným osciloskopem FLUKE snímám proudový ráz v jedné fázi v momentu přifázování.

#### 5.1.5 Výstupy z měření



Obr. 31 Rázový proud asynchronním generátorem při splněných podmínkách fázování



Obr. 32 Průběh rázového proudu asynchronním generátorem při splněných podmínkách fázování

## 6 Vyhodnocení simulace a praktického experimentu

### 6.1 Simulace

#### 6.1.1 Příklad 1

Při nepřipojeném budícím obvodu stroj běží do momentu přifázování k síti naprázdno. V momentu přifázování  $t=1s$  se stroj velmi rychle nabudí, díky jalové energii, kterou získá ze sítě, nicméně při dané konfiguraci simulačního modelu nedokáže generovat napětí na hladině sítě (měřená hodnota napětí sítě činí v amplitudě 326,6V, napětí generované strojem dosahuje pouze 295,8V). Synchronizace hladiny napětí generátoru se síťovým je možné docílit zvýšením hnacího momentu. Proudový ráz při připojení stroje k síti ve svém maximu dosahuje hodnoty 8,37A.

#### 6.1.2 Příklad 2

Při připojeném budícím obvodu dochází po sepnutí spínače v čase  $t=5,3s$  k proudovému nárazu o velikosti 17,9A, což má za následek i poměrně velký momentový ráz detekovaný měřidlem přímo v modelu stroje a také napěťový přechodný děj (viz. Obr 22). Špičková hodnota tohoto momentového rázu činí 63,6Nm, jedná se tedy o nedokonalé přifázování. V čase  $t=5,3s$  generátor připojuji proto, aby se motor dokázal nabudit na maximální možnou hodnotu generovaného napětí a také, aby bylo demonstrováno naprosto slepé přifázování v libovolném momentu, tedy nesplnění jedné z podmínek fázování.

Po bližší analýze průběhů napětí sítě a generátoru před přifázováním zjišťuji, že stroj se napojuje na síť se zpožděním napětí 8,2ms (Obr. 23 červená křivka = napětí generátoru).

Trojčlenkou spočítám hodnotu fázového posuvu v radiánech:

$$\begin{aligned} 2\pi &= 0,02s \\ x &= 0,0082s \rightarrow x = \frac{0,0082}{0,02} \cdot 2\pi = 2,58 \text{ rad} \end{aligned} \quad (31)$$

Posuv mezi napětím sítě a generátoru tedy činí  $147,6^\circ$  pro první fázi.

#### 6.1.3 Příklad 3

Z případu 2 jsem vysledoval na průbězích okamžik, kdy se napětí sítě a generátoru nachází ve fázi. Tento čas jsem odečetl a použil pro simulaci ideálního připojení generátorového systému k síti. Tato chvíle nastává v čase  $t=4,873s$ , kdy je stroj plně nabuzen a fázový posuv činí pouhé 0,2ms tedy 0,063 rad  $\rightarrow 0,02^\circ$ . Z hlediska proudu je minimalizován jeho ráz při samotném připojení stroje k síti, proudová špička dosahuje zhruba dvanáctiny hodnoty proudové špičky z minulého případu a tedy 1,5A. Momentový ráz je oproti případu 2 téměř 40x menší, jeho hodnota činí 1,6Nm.

### 6.2 Měření

Ze změřeného průběhu jsou zřetelné proudové špičky způsobené sepnutím stykače a následný přechodný děj, kdy se proud ustaluje z rázové hodnoty 3,3A na 1,2A. Momentový ráz v realizovaném fázování dosahoval 4,75Nm. Je tedy možné říci, že bylo provedeno téměř dokonalé fázování. Vzhledem k použitému vybavení při měření nebylo možné naprosto přesně srovnat hodnoty napětí sítě a generátoru

a také k naprosto přesnému splnění podmínek fázování, neboť průběhy napětí (zajištění podmínky nulového fázového posuvu), byly sledovány pomocí dvoukanálového osciloskopu, na základě čehož jsem stroj stykačem připojoval k síti. Vznikala tedy odchylka zajisté větší, nežli by vznikla při použití digitálních přístrojů k tomuto účelu určených.

## 7 Závěr BP

Cílem této práce bylo experimentálně vyzkoušet a simulačně potvrdit přítomnost přechodných dějů při přiřazování, zjistit vlivy nedodržení podmínek fázování a budicího vinutí na dodávané hodnoty napětí a proudu. Pokud uvedeme do souvislosti poznatky získané ze simulačního modelu a praktického fázování stroje na síť, je možné tyto výsledky shrnout do několika bodů.

- Nutnost splnění podmínek fázování

Toto je stěžejní předpoklad pro úspěšné přiřazování generátoru do sítě, neboť při nedokonalém, či naprosto slepém přiřazování, dochází k mohutným proudovým a momentovým rázům, které mohou poškodit samotné zařízení. Zároveň je velmi důležité dodržet sled fází, protože v rámci praktického experimentu jsem měl tu možnost vyzkoušet, jakým způsobem ovlivní sled fází chování stroje. Při nedodržení podmínky sledu fází se hřídel stroje s obrovským momentovým rázem zastaví a hřídel se začne otáčet opačným směrem.

- Vhodné omezení proudových rázů

Ze simulací i měření je zřejmé, že proudový ráz vznikne prakticky v každém případě, ať už menší nebo větší. Je proto vhodné jej omezit například bočnickem, zapojeným za motorem, který odvede část proudu a přemění jej na teplo. Toto by bylo možné realizovat v kombinaci s adekvátně nastaveným časovaným spínačem, který by po odeznění přechodného děje vyřadil bočník z obvodu a zamezil tak dodatečným ztrátám. Součástí bakalářské práce je i CD, na kterém je přiložen sestavený simulační model programu ATP, jež je možno použít dalšími studenty pro podrobnější rozpracování dimenzování odporu a časování spínače pro omezení proudových špiček.

- Nutnost budicího obvodu

Za předpokladu rozběhu stroje nepřirozeným způsobem, tedy roztočením hřídele asynchronního stroje dynamometrem, nebo jiným zdrojem mechanického momentu, kdy stroj není připojen ke zdroji jalové energie, je nutným předpokladem pro dodržení podmínky stejné napěťové hladiny zdroj této jalové energie. V mém případě k tomuto účelu posloužily budicí kondenzátory připojené k zátěži v paralelní kombinaci 16 a 30  $\mu\text{F}$ . Stroj rozběhnutý bez budicího obvodu se není schopen vlivem remanentní magnetizace nabudit tak, aby naindukoval ve vinutí dostačující hodnotu napětí pro použití v distribuční síti NN bez doplňujících zařízení.

## 8 Bibliografie

- [1] ROUBÍČEK, I. O. (14. 10 2008). *Motor s kroužkovým rotorem*. Načteno z [http://elektrika.cz/](http://elektrika.cz/http://elektrika.cz/data/clanky/motor-s-krouzkovym-rotorem)
- [2] HOMOLA, Ladislav. *Elektrické stroje na střídavý proud: Příručka pro techniky a studující průmyslových škol*. Vydání II. V Praze: I.L. Kober, 1944
- [3] BARTOŠ, V. *Elektrické stroje I* 1. vyd. Plzeň: Vysoká škola strojní a elektrotechnická, 1986.
- [4] DUŠEK, J. *Speciální asynchronní motor jako zdroj elektrické energie*. Brno. 2008 85s. Bakalářská práce na Fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií na katedře výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí bakalářské práce Ing. Miroslav Skalka
- [5] PETROV, Georgij Nikolajevič. *Elektrické stroje 2*. 1. vyd. Praha: Academia, 1982. ISBN 80-213-1023-5.
- [6] RUSNOK, Stanislav a Pavel SOBOTA. *Cvičení z elektrických strojů*. 1. vydání. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2003. ISBN: 978-80-248-3288-3.
- [7] AUTOR NEUVEDEN. e-automatizace.cz [online]. [cit. 3.3.2016]. Dostupný na WWW: [http://www.e-automatizace.cz/ebooks/ridici\\_systemy\\_akcni\\_cleny/img/Pohony/AC\\_stator.gif](http://www.e-automatizace.cz/ebooks/ridici_systemy_akcni_cleny/img/Pohony/AC_stator.gif)
- [8] STÝSKALA, Vítězslav. *Lekce z elektrotechniky - Indukční stroje*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2004.
- [9] POKORNÝ, Karel. *Elektrotechnika I*. Vyd. 1. Praha: Naroma, 2003. ISBN 80-213-1023-5.
- [10] RICHARDSON, P. *Design and application of large solid-rotor asynchronous generators. Proceedings of the IEE Part A: Power Engineering*[online]. 1958, **105**(22), 332- [cit. 2016-04-24]. DOI: 10.1049/pi-a.1958.0059. ISSN 03698882. Dostupné z: <http://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/pi-a.1958.0059>
- [11] HRABOVCOVÁ, Valéria. *Meranie a modelovanie elektrických strojov*. 1. Žilina: EDIS - vydavateľství Žilinské univerzity, 2009. ISBN 978-80-5540-852-1.
- [12] *Minienyklopedie ELEKTRINA* [online]. [cit. 2016-04-14]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie->
- [13] [online]. [cit. 2016-04-14]. Dostupné z: [http://feil.vsb.cz/kat410/studium/studijni\\_materialy/se/cast\\_B\\_el\\_stroje/se\\_es\\_c2\\_fazovani.pdf](http://feil.vsb.cz/kat410/studium/studijni_materialy/se/cast_B_el_stroje/se_es_c2_fazovani.pdf)
- [14] RUSNOK, S. *Přechodné děje při provozu asynchronních elektromotorů*. Ostrava. 2011 96s. Diplomová práce na Fakultě elektrotechniky a informatiky na katedře elektroenergetiky. Vedoucí diplomové práce Ing. Václav Čech, Ph.D.



## 9 **Seznam příloh**

Příloha I Naměřené hodnoty charakteristiky naprázdno .....	43
Příloha II Vypočtené hodnoty charakteristiky naprázdno .....	44
Příloha III Naměřené hodnoty charakteristiky nakrátko .....	45

**Příloha I Naměřené hodnoty charakteristiky naprázdno**

I <sub>1</sub> (A)	I <sub>2</sub> (A)	I <sub>3</sub> (A)	U <sub>1</sub> (V)	U <sub>2</sub> (V)	U <sub>3</sub> (V)	P <sub>1</sub> (W)	P <sub>2</sub> (W)	P <sub>3</sub> (W)
7,682	7,728	7,727	473,273	472,888	469,922	-1396,63	-3623,75	2183,78
7,679	7,717	7,721	473,149	472,872	470,061	-1395,57	-3618,77	2184,59
7,65	7,697	7,688	473,285	473,22	469,61	-1385,2	-3611,95	2171,02
7,645	7,694	7,689	473,19	473,3	469,89	-1385,73	-3611,16	2171,04
7,628	7,674	7,667	473,275	473,088	469,623	-1380,9	-3600,33	2164,77
7,621	7,655	7,66	473,152	472,834	469,791	-1384,1	-3589,42	2167,99
7,604	7,644	7,637	472,852	473,156	469,896	-1373,45	-3586,82	2160,26
7,595	7,624	7,629	472,707	472,442	469,608	-1375,23	-3571,58	2161,5
7,592	7,631	7,629	472,936	472,848	469,266	-1373,87	-3577,93	2156,43
7,583	7,632	7,617	472,836	473,127	469,751	-1368,32	-3580,81	2151,4
7,578	7,598	7,606	472,445	472,473	469,557	-1371,66	-3560,07	2154,54
7,578	7,616	7,614	472,969	472,753	469,306	-1373,65	-3570,27	2150,24
7,573	7,605	7,597	472,503	472,867	469,38	-1365,5	-3566,55	2147,45
6,766	6,801	6,778	462,259	462,423	459,164	-1208,61	-3121,32	1858,24
5,152	5,184	5,141	438,105	438,034	435,058	-886,571	-2256,4	1318,05
3,716	3,736	3,695	410,124	409,407	407,141	-601,047	-1520,5	884,345
3,46	3,48	3,44	404,06	403,83	401,41	-548,76	-1398,72	811,57
3,35	3,36	3,32	400,89	400,32	398,24	-528,02	-1336,57	778,48
2,629	2,637	2,593	378,969	378,362	376,625	-383,257	-991,551	581,409
1,941	1,943	1,895	344,959	344,125	342,392	-244,181	-663,838	396,198
1,555	1,546	1,509	309,075	308,454	307,344	-165,014	-472,366	292,969
1,28	1,27	1,25	273,17	272,45	271,26	-111,673	-341,936	221,936
1,057	1,044	1,027	235,063	234,181	233,213	-69,62	-238,97	165,265
0,876	0,86	0,849	197,757	197,373	196,68	-38,554	-163,521	122,857
0,733	0,717	0,712	162,914	162,657	162,026	-17,044	-109,409	91,061
0,618	0,6	0,605	129,573	129,4	128,784	-1,275	-68,276	67,646
0,603	0,585	0,594	121,898	121,94	121,343	1,795	-61,04	64,036

**Příloha II Vypočtené hodnoty charakteristiky naprázdno**

$I_0$ (A)	$U_0$ (V)
7,711	472,067
7,705	472,077
7,678	471,993
7,677	472,016
7,657	471,994
7,644	471,965
7,63	471,861
7,617	471,645
7,615	471,643
7,611	471,847
7,603	471,665
7,594	471,588
7,593	471,537
6,779	461,116
5,154	436,845
3,712	408,928
3,46	402,94
<b>3,34</b>	<b>399,84</b>
2,617	377,914
1,925	343,698
1,535	308,119
1,27	272,06
1,042	233,991
0,861	197,131
0,721	162,398
0,607	129,177
0,593	121,684

**Příloha III Naměřené hodnoty charakteristiky nakrátko**

I <sub>1</sub> (A)	I <sub>2</sub> (A)	I <sub>3</sub> (A)	I <sub>c</sub> (A)	U <sub>1</sub> (V)	U <sub>2</sub> (V)	U <sub>3</sub> (V)	U <sub>c</sub> (V)
4,128	4,257	4,288	4,225	77,938	78,14	77,48	77,854
4,313	4,452	4,478	4,415	80,945	80,966	80,134	80,688
4,629	4,816	4,847	4,764	85,723	85,638	85,312	85,564
4,628	4,817	4,846	4,763	85,743	85,681	85,324	85,584
4,63	4,814	4,846	4,764	85,754	85,669	85,345	85,601
4,627	4,816	4,84	4,762	85,761	85,711	85,312	85,586
4,73	4,876	4,907	4,842	86,884	86,922	86,001	86,648
<b>4,839</b>	<b>4,995</b>	<b>5,023</b>	<b>4,957</b>	<b>88,62</b>	<b>88,465</b>	<b>87,488</b>	<b>88,259</b>
5,317	5,495	5,517	5,446	95,571	95,351	94,13	95,055
6,686	6,918	6,941	6,85	114,626	113,877	112,511	113,7
7,122	7,375	7,387	7,301	120,395	119,675	118,165	119,484
8,633	8,776	8,674	8,568	135,489	137,674	131,037	132,8